

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Charakteristiky chování pevných biopaliv na pohyblivém roštu

The Solid Biofuel Bed Characterization for a Travel Grate

Student:

Bc. David Socha

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Socha**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Charakteristiky chování pevných biopaliv na pohyblivém roštu**
The Solid Biofuel Bed Characterization for a Travel Grate

Zásady pro vypracování:

- 1) Rešerše oblastí roštových kotlů a proudění vzduchu přes vrstvu paliva
- 2) Návrh a konstrukce zkušebního testovacího zařízení včetně výkresové dokumentace
- 3) Vlastní měření, stanovení charakteristik paliv
- 4) Vyhodnocení výsledků a porovnání měření s reálnou situací
- 5) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Kamila, Š., Kamil, S., Ivo, B., Jan, H., Petr, S.: Parní kotle (Návody do cvičení), Ostrava, 2007. dostupné zde: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
Ferdinand, H.: Rošty parních kotlů a spalování méně hodnotných paliv. Praha, 1957.
Václav, Č.: Parní kotle a spalovací zařízení. Praha, 1975.
Firemní materiály fy Vyncke.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr.Ing. Tadeáš Ochodek**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Společnost Vyncke souhlasí s uveřejněním technických údajů, které poskytlo pro účely vypracování diplomové práce.

V Ostravě...18.5. 2015.....

.....David Gocha.....
Podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., - autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě18.5. 2015.....

.....David Socha.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

DAVID SOCHA

Adresa trvalého pobytu autora práce:

BEZRUČOVA 440
FRÝDEN-MÍSTEN

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SOCHA, David. *Charakteristiky chování pevných biopaliv na pohyblivém roštu*. Ostrava, 2015. 97 s. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek

Diplomová práce se zabývá stanovením charakteristik chování pevných biopaliv na pohyblivých roštech. V úvodu představuje základní technologii ohnišť průmyslových kotlů a jejich aplikaci v praxi s důrazem na kotle roštové. Na základě požadavků firmy Vyncke je v praktické části navrženo testovací zařízení pro simulaci proudění primárního spalovacího vzduchu skrz vrstvu paliva na roštu. Vysvětluje principy a metodiku měření, popisuje význam a funkci zařízení použitého pro stanovení charakteristik chování biopaliv v jednotlivých uspořádáních roštu pro různé vrstvy paliva. Je řešen výpočet tlakové ztráty pomocí Ergunovy rovnice.

Klíčová slova: biomasa, biopaliva, tlaková ztráta, kotel, rošt, Ergunova rovnice, Vyncke

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SOCHA, David. *The Solid Biofuel Bed Characterization for a Travel Grate*. Ostrava, 2015. 97 p. Master thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering. Thesis head: Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek.

The introduction presents the basic technology of industrial boilers and its application in practice with an emphasis on the grate firing. According requirements from Vyncke a test rig is designed to simulate the flow of primary combustion air through a layer of fuel on the grate. The methodology of measurement is explained, for both the grate itself and the grate with fuel. The principles of measurement are also explained, including a description for the device used to determine main characteristics. The characteristics of the fuel bed resistance are discussed in function of bed height for each fuel. Pressure drop calculation is solved using Ergun equation.

Keywords: biomass, biofuels, pressure drop, boiler, grate, Ergun equation, Vyncke

Obsah

Seznam použitého značení	8
1 Úvod	9
2 Ohniště	10
2.1 Ohniště na plynná paliva	10
2.2 Ohniště na kapalná paliva	10
2.3 Ohniště kombinovaná, sloužící ke spalování různých fází	10
2.4 Ohniště na pevná paliva	11
2.4.1 Fluidní ohniště	11
2.4.2 Prášková ohniště	11
2.4.3 Cyklónová ohniště	12
2.4.4 Roštová ohniště	13
3 Roštová ohniště	13
3.1 Části rostového ohniště	13
3.2 Funkce roštu	14
3.3 Fáze hoření	14
3.4 Spalování	15
3.5 Složení a vlastnosti paliva	16
3.6 Spalovací vzduch	16
3.6.1 Funkce spalovacího vzduchu	16
3.6.2 Přebytek spalovacího vzduchu	17
3.6.3 Pásmování a rozvody vzduchu	17
3.7 Tlaková ztráta vrstvy paliva	18
3.8 Typy roštových ohnišť – dle tvaru ohniště	18
3.8.1 Roštová ohniště s jedním ohniskem hoření	18
3.8.2 Roštová ohniště se dvěma ohnisky hoření	19
3.9 Spalování biomasy	19
3.10 Emise při spalování biomasy v roštových ohništích	20
3.11 Typy roštu - dle způsobu přemísťování paliva	21
3.11.1 Rošty s nehybnou vrstvou paliva – pevné rošty	21
Rošty s přemísťováním paliva – mechanické rošty	21
3.11.2 Rošty s trvalým přemísťováním paliva	21
3.11.3 Rošty s občasným přemísťováním paliva	22
3.12 Roštnice	24
3.12.1 Vzduchem chlazené roštnice	24
3.12.2 Vodou chlazené roštnice	24
3.12.3 Pohyb roštnic a paliva	25
3.13 Paliva, vhodná pro spalování na roštových ohništích	26

3.13.1	Fosilní paliva.....	26
3.13.2	Uměle vyrobená paliva	26
3.13.3	Komunální a průmyslový odpad.....	26
3.13.4	Biomasa	26
3.14	Společnost Vyncke	27
4	Návrh a konstrukce zkušebního testovacího zařízení	28
4.1	Návrh koncepce zařízení	28
5	Měřicí zařízení	42
5.1	Venturiho trubice	42
5.2	Cyklon.....	43
5.3	Snímače diferenčního tlaku.....	44
5.4	Ventilátor.....	45
5.5	Obecný popis měření.....	45
6	Tlaková ztráta – měření bez paliva, metodika měření	48
6.1	Měření samostatného roštu	48
6.2	Měření prázdného roštu s použitím mezer mezi roštnicemi	49
6.3	Metodika měření paliva.....	54
6.3.1	Stanovení metodiky měření paliva	54
6.3.2	Výsledná metodika měření paliva.....	57
6.4	Tlaková ztráta paliva – měření, výpočet a vyhodnocení.....	58
6.4.1	Tlaková ztráta dle Ergunovy rovnice.....	58
6.4.2	Měřená paliva	58
6.4.3	Dřevní pelety - výpočet a měření tlakové ztráty.....	60
6.4.4	Srovnání měřených a vypočtených hodnot.....	66
6.4.5	Měření - Dřevní štěrka	67
6.4.6	Měření - Kukuřičné klasy	71
6.4.7	Měření - Výlisky z oliv	75
6.4.8	Měření - Pelety ze slunečnicových slupek.....	79
6.4.9	Měření - Kávová sedlina.....	83
6.5	Vyhodnocení měření paliv	87
6.6	Vylepšení stávajícího zařízení.....	89
6.7	Srovnání s reálnou situací	90
7	Závěr	91
8	Seznam použité literatury	93
9	Seznam tabulek, obrázků, grafů a příloh	95

Seznam použitého značení

Symbol	Název veličiny	Jednotka
d	průměr	[m]
h	délka	[m]
L	výška vrstvy	[m]
\dot{Q}	objemový průtok	[m ³ /h]
Q_i	výhřevnost	[kJ/kg]
Q_n	spalné teplo	[kJ/kg]
r	poloměr	[m]
S	povrch	[m ²]
U	rychlost proudění	[m/s]
V	objem	[m ³]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
μ	dynamická viskozita	[kg/(m·s)]
ϱ	hustota	[kg/m ³]
ϕ	sféricita (=kulatost) částic	[1]
ε	porozita materiálu	[1]

Indexy

d	suchý stav paliva
g	plyn
k	koule
p	peleta
r	surový stav paliva
s	sypná

Zkratky

FW	fully water cooled – plně vodou chlazené
SW	semi water cooled – částečně vodou chlazené
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein - Technické kontrolní sdružení
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

1 Úvod

Rostoucí spotřeba fosilních paliv a emise znečišťujících látek do životního prostředí, stoupající energetická náročnost těžby a s tím spojené vyšší ceny za energie jsou hlavními stimuly pro vývoj a aplikaci úspornějších technologií a obnovitelných zdrojů. Jejich cílem je efektivnější využití energie obsažené v palivu, zlepšení energetické bezpečnosti zásobování energiemi, omezení emise znečišťujících látek a snížení celkové energetické závislosti státu a náročnosti ve výrobě, distribuci a spotřebě energií.

Organická hmota rostlinného původu (biomasa), tvořená sacharidy a bílkovinami, vzniká důsledkem dopadající sluneční energie pomocí fotosyntézy probíhající v zeleném barvivu rostlin. Oproti spalování fosilních paliv má spalování biomasy v podstatě nulovou bilanci oxidu uhličitého a nezatěžuje tak životní prostředí. Spalováním biomasy se produkuje oxid uhličitý, ale přibližně stejné množství je spotřebováno fotosyntézou při růstu rostliny. Nízký je rovněž obsah uvolňovaných oxidů síry a NO_x . V biopalivech značně převažují paliva pevná nad palivy kapalnými jako bionafta a palivy plynými, jako je například bioplyn.

Vyncke je rodinná společnost, která byla založena roku 1912 v Belgii. Od té doby dosáhla postavení jednoho ze světových hráčů na trhu v technologiích výroby čisté energie; především v oblasti energetických zdrojů o výkonu 1 - 100 MW, vyrábějících energii spalováním biomasy a odpadů. Silnou stránkou firmy jsou zákaznická řešení šitá přímo na míru konkrétním podmínkám a potřebám.

V diplomové práci si kladu za cíl stanovit charakteristiky chování pevných biopaliv na pohyblivých roštech. Úvodní teoretická část představí základní rozdělení technologie ohnišť průmyslových kotlů a jejich aplikaci v praxi. Detailněji se zaměřím na technologii roštových kotlů.

Na základě požadavků firmy Vyncke v praktické části navrhnu testovací stand pro simulaci proudění primárního spalovacího vzduchu skrz vrstvu paliva na roštu. Dále bude navrhnut testovací trať a propojení jednotlivých zařízení. Znalost tlakové ztráty roštu a vrstvy paliva je klíčová pro správné dimenzování ventilátorů spalovacího vzduchu a pro kvalitní návrh roštové plochy, umožňující optimální vedení spalovacího procesu, zejména s přihlédnutím k emisím CO . Budou objasněny principy měření tlakové ztráty a popsány funkce zařízení použitého pro stanovení charakteristik. Stanovím metodiku pro měření roštu samotného i pro měření pevných biopaliv. Tlaková ztráta bude také vypočtena pomocí Ergunovy rovnice.

2 Ohniště

Ohniště je hlavní část kotle, kde je spalováno palivo. Dochází zde k přeměně chemické energie obsažené v palivu na tepelnou energii plamene a spalin. Tato energie je dále předávána výhřevným plochám.

Dle druhu spalovaného paliva dělíme ohniště

2.1 Ohniště na plynná paliva

Topné plyny jsou ideálním palivem. Konstrukce ohniště je nejjednodušší a investiční náklady nejnižší. Doprava plynu je snadná, palivo není nutné čistit a upravovat, jelikož se tyto činnosti dějí již v místě těžby nebo výroby plynu. Plynná paliva se dobře mísí se vzduchem, je tedy možno je spalovat s velmi nízkým přebytkem spalovacího vzduchu. Odpadá zde ztráta citelným teplem strusky, mechanickým nedopalem a komínová ztráta je díky nízkému přebytku vzduchu malá. Nejsou zapotřebí zařízení pro odvod tuhých zbytků a popílku a jejich složiště. Díky nepatrnému obsahu popelovin v plynných palivech se snižují obtíže s čištěním teplosměnných ploch a není nutné instalovat odlučovače popílku.

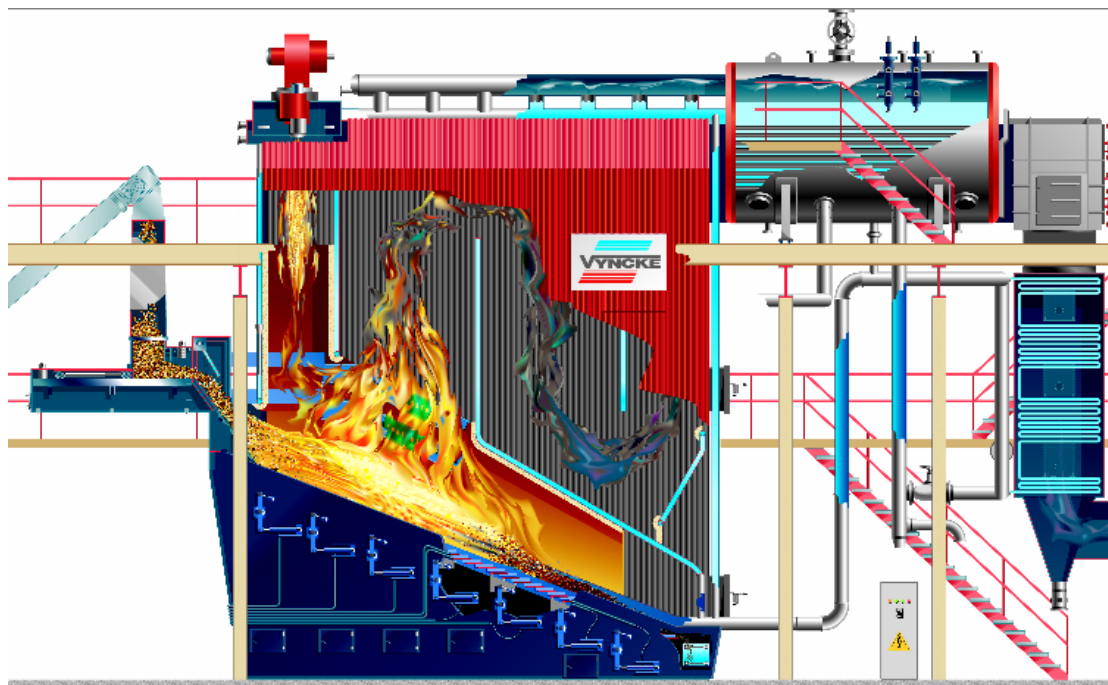
2.2 Ohniště na kapalná paliva

Spalováním kapalných paliv je převážně myšleno spalování topných olejů, tedy různých produktů frakční destilace ropy. Palivo je rozprášeno pomocí hořáků na co nejmenší kapky a míšeno se spalovacím vzduchem. Hlavní výhodou kapalných paliv je vysoká výhřevnost, snadná doprava a skladování. Příprava paliva ke spalování zahrnuje zvýšení tlaku na hodnotu potřebnou pro konkrétní typ hořáku. Dále pak u těžkých a viskózních kapalin vyžaduje palivo předeřev na potřebnou teplotu cca. 150 °C v kompletních dopravních cestách, skladovacích nádržích i v hořáku. Nedodržení žádané teploty vede k horšímu rozprášení paliva v hořácích a abrazi otvorů trysek. Kapalná paliva vyžadují vyšší nároky na požární bezpečnost a instalaci záchytných van pro případ netěsnosti skladovacích nádrží. Konstrukce topeniště i hořáků je podobná zařízením spalující plynná paliva.

2.3 Ohniště kombinovaná, sloužící ke spalování různých fází

Tyto ohniště slouží k spalování několika různých druhů, popřípadě fází paliv. Nejčastěji se jedná o ohniště na pevná paliva s přídatnými hořáky na plynná či kapalná paliva nebo roštová ohniště s přídatným spalováním prachového paliva. Hořáky jsou zabudovány do stěn spalovací komory a tomu musí být přizpůsoben tvar komory a rozvod vzduchu. Kombinovaná ohniště jsou používána z několika příčin:

- a) Spalování méně hodnotných paliv a paliv s vysokou vlhkostí – nutnost stabilizačních hořáků
- b) Zvyšování jmenovitého výkonu z důvodu nedostatku určitého paliva
- c) Zajištění plynulosti provozu z důvodu nerovnoměrnosti dodávky paliva



Obrázek 2.1: Kombinovaný kotel Vyncke s roštovým ohništěm pro spalování dřevního odpadu a plynovým hořákem [3]

2.4 Ohniště na pevná paliva

Dle způsobu spalování dělíme

2.4.1 Fluidní ohniště

Kotle pracují na principu spalování drceného paliva ve fluidní (kypící) vrstvě. Fluidizace je děj, při kterém je skupina pevných částic udržována ve vznosu proudem tekutiny. Částičky paliva jsou nadnášeny proudem spalovacího vzduchu, který proudí svisle vzhůru skrze vrstvu. Pro nastolení rovnováhy gravitačních sil částic a jejich aerodynamického odporu, se zvětšováním průtočného průřezu ohniště snižuje rychlost spalin. Dochází k rozvrstvení paliva dle zrnitosti a setrvání částice ve fluidní vrstvě až k dokonalému vyhoření. Tato ohniště jsou vhodná pro spalování širokého spektra paliv včetně odpadů a kapalných paliv. Nízké teploty spalování ve fluidní vrstvě a postupný přívod vzduchu do ohniště má příznivý dopad na emise NO_x .

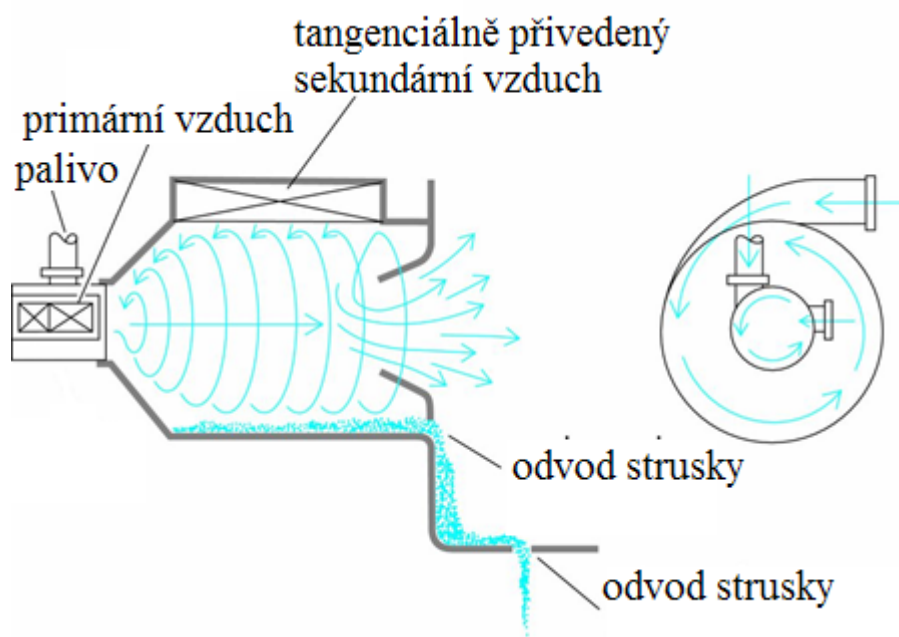
2.4.2 Prášková ohniště

V práškovém ohništi je spalován uhlý prášek, rozemletý na velikost zrn pod 1 mm. Rozemletím uhlí na prášek dochází k zvětšování měrného povrchu paliva a tím

dosahujeme intenzivnějšího spalovacího procesu. Uhlí je rozemleto v mlecích okruzích na prášek, také zde dochází k vysušení paliva. Rozemletý prášek je do ohniště přiváděn pneumaticky pomocí nosného média, které nazýváme primární směs. Nosným médiem mohou být spaliny nebo jejich směs společně se vzduchem. Směs nosného média spolu s uhelným práškem a sekundární vzduch je přiváděn tryskami hořáků do prostoru ohniště. Zde se mísí s dalším tzv. terciálním vzduchem. Tato ohniště jsou používány pro spalování méně kvalitních druhů uhlí a pro nejvyšší výkony. Rozlišujeme dva druhy práškových kotlů. Granulační se suchým odvodem tuhých zbytků z ohniště ve formě škváry a výtavné s tekutým odvodem tuhých zbytků z ohniště ve formě tekuté strusky.

2.4.3 Cyklónová ohniště

Spalování ve velkých práškových ohništích má difuzní charakter, tudíž je rychlost hoření určena zejména intenzitou směšování paliva a okysličovadla. S rostoucími rozměry spalovacích prostor se zhoršuje možnost ovládat míšení paliva a okysličovadla v ohništi. Dostačující turbulence je jen v blízkosti hořáků. Malá turbulence a nízká koncentrace kyslíku ve vzdálenějších oblastech značně zpomaluje hoření, tudíž je zapotřebí zvětšit spalovací prostor, jinak bude docházet k vysoké ztrátě nedopalem. Cyklónová ohniště byla vyvinuta, aby zlepšením kinetiky hoření částice tento problém odstranily. Jedná o válcovou komoru, do které tangenciálně vstupuje vzduch o vysoké rychlosti a způsobuje vířivý pohyb částic a prodlužuje jejich setrvání v ohništi až do dokonalého vyhoření. Z velké části může kinetické hoření probíhat v horizontálních nebo vertikálních ohništích.



Obrázek 2.2: Cyklónová ohniště [10]

2.4.4 Roštová ohniště

– viz samostatná kapitola 3 Roštová ohniště

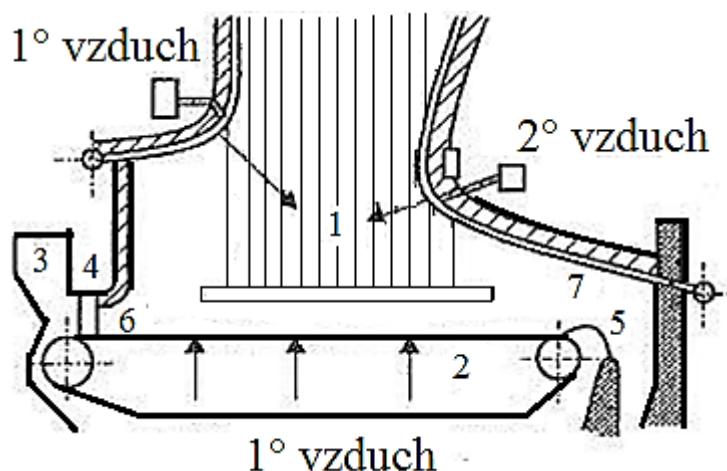
3 Roštová ohniště

Jedná se o typ průmyslového ohniště, které je určeno ke spalování kusových paliv bez větší úpravy filtračním způsobem v hořící vrstvě. Při tomto spalování leží palivo na roštu ve vrstvě, jejíž tloušťka záleží na tepelném výkonu a prodyšnosti vrstvy pro spalovací vzduch. Průchodem vzduchu skrz hořící vrstvu dochází ke kinetickému spalování. Uvolněná prchavá hořlavina dohoří ve spalovací komoře a drobné částičky paliva hoří ve vzhledu v proudu vzduchu a spalin. Podíl hoření nad vrstvou paliva je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny v palivu. V současné době se nové roštové kotle na uhlí téměř nestaví, je jich však velké množství v provozu. Nové roštové kotle se staví zejména pro spalování biomasy a dále na spalování komunálních a průmyslových odpadů.

3.1 Části roštového ohniště

Základní části roštového ohniště - Obrázek 3.1. Ohniště (1) je ohraničeno roštem (2), přední (6) a zadní (7) klenbou. Palivo je na rošt dávkováno ze zásobníku paliva násypkou (3) přes hradítko výšky paliva (4). Pevný zbytek paliva je odváděn přes škvárový jízec (5) do škvárové výsypky.

Samotný rošt je tvořen nosnou konstrukcí, roštnicemi a u mechanických roštů také pohonným zařízením pro pohyb roštu. V roštu je umístěn mechanismus pro rozvod a řízení primárního spalovacího vzduchu. Tvar a velikost použitých roštnic závisí na funkci roštu, druhu a vlastnostech spalovaného paliva, způsobu odvodu škváry, teplotě a typu přívodu spalovacího vzduchu.



Obrázek 3.1: Hlavní části roštového ohniště

3.2 Funkce roštu

- podpírat spalované palivo
- umožnit tvorbu vrstvy o požadované tloušťce a prodyšnosti při co nejmenším propadu a úletu paliva
- zajišťovat přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých zón roštu, aby se spalování odehrávalo za nejvhodnějšího přebytku vzduchu
- zabezpečit pozvolné vysušení paliva, zahřátí na zápalnou teplotu a zapálení, hoření a dokonalé vyhoření všech zrn paliva
- shromažďovat tuhé zbytky po spalování a zajistit jejich odvod z prostoru ohniště
- regulovat tepelný výkon dle požadavků

3.3 Fáze hoření

Palivo na roštu prochází těmito charakteristickými fázemi - Obrázek 3.2

1) Fáze sušení

- spalované palivo vždy obsahuje vodu, která se musí odpařit
- palivo se ohřívá na teplotu varu vody při daném tlaku
- teplota paliva se rovná teplotě varu, dokud se veškerá voda neodpaří (teoreticky)
- přivedené teplo je spotřebováno na odpařování vody

2) Fáze uvolňování prchavé hořlaviny

- stoupá teplota paliva a začínají se uvolňovat jednotlivé složky prchavé hořlaviny (od nejlehčích k těžkým)
- po dosažení zápalné teploty začíná hořet prchavá hořlavina nad vrstvou paliva

3) Zapálení pevné složky

- prchavá hořlavina hoří na povrchu vrstvy, kterou postupně zapaluje

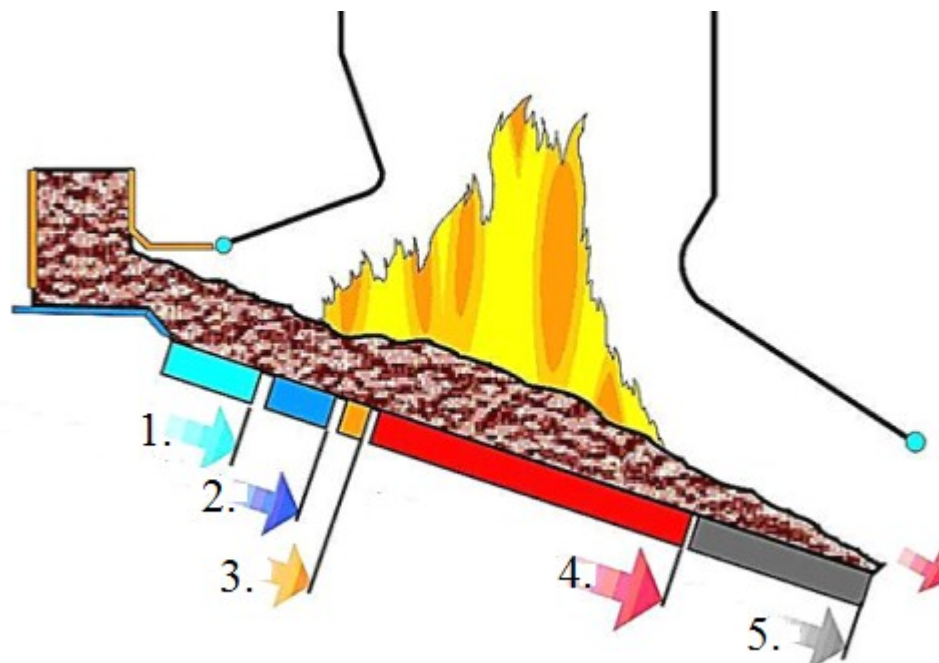
4) Hoření

- postupné vyhořívání zrn ve vrstvě sušiny paliva
- fáze je doprovázena prudkým nárůstem teploty

5) Dohořívání

- dochází k vyhořívání zrn paliva, rozpadu pevné fáze a postupnému poklesu teploty vrstvy
- vychladlé tuhé zbytky jsou odváděny do škvárové výsypky

Pro správný průběh všech fází spalování na roštu, je nutné, aby se část tepla uvolněného spalováním vrátila do reakce a umožnila tak zapálení dalšího paliva. Tato část tepla se nazývá poměrné vzněcovací teplo.



Obrázek 3.2: Fáze hoření na šikmém roštu [6]

3.4 Spalování

Při spalování paliv se mění chemická energie obsažená v palivu v energii tepelnou o vysokém teplotním potenciálu. Spalování probíhá při každé reálné teplotě. Tohoto děje se účastní:

a) Palivo

Jedná se o jakoukoliv, hojně se vyskytující a dostupnou hořlavou látku s dostačující výhřevností a aktivitou okysličovacích pochodů. Nejčastěji bývá organického původu.

b) Okysličovadlo

Je látka obsahující kyslík. Vždy je tedy nutná přítomnost okysličovadla. V energetice je nejčastěji užíván jako zdroj kyslíku okolní vzduch obsahující přibližně pětinu kyslíku.

c) Produkty spalovacího procesu

Jsou výsledkem chemické reakce mezi palivem a okysličovadlem. Řadí se zde plynné spaliny a struska v tuhé či kapalně formě.

Hoření tvoří souhrn exotermických reakcí paliva a okysličovadla. Tyto reakce probíhají za intenzivního uvolňování tepla, rychlého nárůstu teploty reagujících složek a světelného efektu. K iniciaci hoření může dojít samovolně (samovznícení) nebo přivedením externího impulsu (jiskra).

3.5 Složení a vlastnosti paliva

Palivo je látka, jejímž hořením se uvolňuje teplo, které lze využívat pro naše účely – vytápění, vaření, hygiena. Je tvořeno hořlavinou a balastem. Hořlavina je žádoucí část paliva, jelikož je nositelem energie. Balast označuje část paliva bez energetického zisku, jedná se o vodu a popelovinu. S klesajícím obsahem popeloviny a vody se zvyšuje jakost paliva, jednodušeji a účinněji se spaluje, obsahuje více energie. Se snižujícím se množstvím popeloviny klesá emise tuhých znečišťujících látek a zjednodušuje se náročnost údržby a provozu spalovacího zařízení.

Organická část paliva se skládá z uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a síry. Uhlík, vodík a kyslík velkou měrou působí na spalovací proces. Dusík a síra spíše ovlivňují produkci znečišťujících látek. Aktivní složka hořlaviny tvořená uhlíkem, vodíkem a sírou je nositelem energie chemicky vázané v palivu, která se uvolňuje spalováním. Pasivní složka hořlaviny, skládající se z kyslíku a dusíku nemá energetickou hodnotu.

Nejdůležitějšími parametry charakterizujícími palivo je výhřevnost a spalné teplo. Tyto veličiny popisují množství chemicky vázaného tepla, které se uvolní dokonalým spálením paliva. Výhřevnost je množství tepla uvolněné dokonalým spálením paliva při ochlazení spalin na výchozí teplotu za vzniku vody ve formě páry. Spalné teplo je množství tepla uvolněné dokonalým spálením paliva při ochlazení spalin na výchozí teplotu. Dojde ke kondenzaci vodní páry.

3.6 Spalovací vzduch

3.6.1 Funkce spalovacího vzduchu

Vzduch má během spalovacího procesu mnoho funkcí, je tedy nezbytné zvážit v jednotlivých částech ohniště specifické množství, teplotu, směr a rychlost proudění spalovacího vzduchu.

- okysličovadlo – nezbytné pro proces hoření paliva
- teplotonosné médium
- chlazení plamene
- nosné médium hořících jemných částic paliva
- určení směru proudu spalin, promíšení směsi, podpora kinetiky hoření
- přívod předeřátého vzduchu napomáhá hoření vlhkých paliv
- sušící médium paliva
- chlazení roštnic a dalších částí umístěných v ohništi

3.6.2 Přebytek spalovacího vzduchu

Pro dokonalé spálení paliva je nutné k palivu přivést stechiometrické množství vzduchu. Spalovat palivo s tímto minimálním množstvím vzduchu je v praxi nereálné. Proto užíváme spalování s přebytkem vzduchu. Tento přebytek vzduchu, který se neúčastní reakce, musíme však ohřívat a zpět ochlazovat, zvyšuje komínovou ztrátu a požadavky na ventilátory. Spalovací vzduch je přiveden do jednotlivých částí spalovacího roštu v daném množství, aby splňoval požadavky konkrétní části roštu a fáze hoření. Nevýhodou roštových kotlů je nutnost volit vyšší přebytky vzduchu $n = 1,3 - 1,6$.

3.6.3 Pásmování a rozvody vzduchu

Spotřeba vzduchu je v jednotlivých fázích hoření značně odlišná. Při fázi sušení využíváme vzduch pro sušení vlhkého paliva. Vzhledem k tomu, že nedochází k hoření, není nutné přivádět velké množství vzduchu. Postačí množství nezbytné k chlazení roštnic. Fáze odplynění, zapálení a hoření vyžadují velké množství spalovacího vzduchu jako okysličovadla a rovněž jako média chladicí roštnice. Dochází k spalování uvolněné prchavé hořlaviny i pevné složky paliva. V případě vlhkého paliva přivádíme přehřátý vzduch, abychom předešli dalšímu vychlazování spalovacího prostoru. V závěrečné fázi dohořívání využíváme malé množství vzduchu, hlavně pro chlazení roštnic.

Spotřeba vzduchu v jednotlivých částech roštu je, jak již bylo vysvětleno výše dosti rozdílná. Tento stav se řeší rozdělením prostoru pod spalovacím roštem na několik komor – pásem, kam je přiváděn spalovací vzduch, jehož potřebné množství se reguluje klapami. S rostoucím výkonem roštů, roste i počet pásem. Při tvorbě pásmování spalovacího vzduchu je nezbytné zohlednit i vlastnosti spalovaného paliva.

Spalovací vzduch je přiváděn pomocí vzduchových ventilátorů. U menších kotlů pokrývá jeden ventilátor veškerou spotřebu primárního a sekundárního vzduchu. Rozdělení vzduchu v požadovaném poměru je provedeno regulačními odbočkami na potrubí. Škrcením ventilátoru, či změnou otáček regulujeme celkové množství vzduchu. Větší jednotky využívají nezávislé ventilátory pro primární, sekundární, popřípadě terciální vzduch.

Reálný spalovací proces není možné přesně nasimulovat, a proto v praxi dochází k nastavování spalovacích poměrů, směřování spalovacího vzduchu a jeho teploty až během zkušebního provozu. Je nezbytné sledovat parametry kotle, složení a teplotu spalin, u spalovacího vzduchu rovněž přebytek. Veškeré hodnoty je nutné vzájemně přizpůsobit a nalézt nejlepší variantu.

Optimální rozdělení vzduchu je nezbytné pro

- nízké emise
- nízký obsah uhlíku v polétavém prachu a popelu
- vysoké zatížení roštu

3.7 Tlaková ztráta vrstvy paliva

Prouděním skutečných tekutin vzniká tření o povrch průtočného kanálu, obtékaných těles i tření uvnitř tekutiny. Tímto třením přichází tekutina o kinetickou energii, a aby protekla kanálem požadovaným průtokem musí získat kinetickou energii na úkor poklesu celkového tlaku na druhé straně kanálu - vzniká tlaková ztráta Δp . Během dopravy tekutin zůstává jejich hustota přibližně stejná, proto se aplikuje teorie pro nestlačitelnou tekutinu - zejména Bernoulliho rovnice. Tlaková ztráta způsobuje pokles celkové měrné energie. Tato vnitřní energie musí být do tekutiny znova přivedena pomocí čerpadla, ventilátoru či kompresoru, jinak by docházelo ke zpomalování proudění.

Tlaková ztráta roštu a vrstvy paliva při dané dimenzi ventilátorů podstatně ovlivňuje množství spalovacího vzduchu u roštových ohnišť, a tím i provoz celého kotle. Na odporu vrstvy paliva záleží střední měrný tepelný výkon roštu, protože je v určitém rozsahu přímo úměrný tloušťce vrstvy paliva. Nejvyšší vrstva paliva se odvíjí z přípustné tlakové ztráty vrstvy. Znalost poklesu tlaku vzduchu, proudícího přes vrstvu nepravidelných částic paliva, je důležitá při projekci spalovacích roštových kotlů pro návrh ventilátorů spalovacího vzduchu, dále pro optimální řízení spalovacího procesu a maximální účinnost.

3.8 Typy roštových ohnišť – dle tvaru ohniště

Spalování paliva v roštových ohništích probíhá jednak ve vrstvě paliva na roštu (tuhý uhlík), tak v prostoru nad vrstvou paliva (uvolněná prchavá hořlavina). Podíl hoření nad vrstvou paliva bude tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny v palivu. Pokud hořící uhlovodíky prchavé hořlaviny přijdou do styku s chladnou výhřevnou plochou, může dojít k jejich rozkladu na H_2 a C. Vzniklý amorfni uhlík má vyšší zápalnou teplotu, nevyhoří a ukládá se na výhřevných plochách. Z tohoto pohledu rozlišujeme dvě základní konstrukční koncepce:

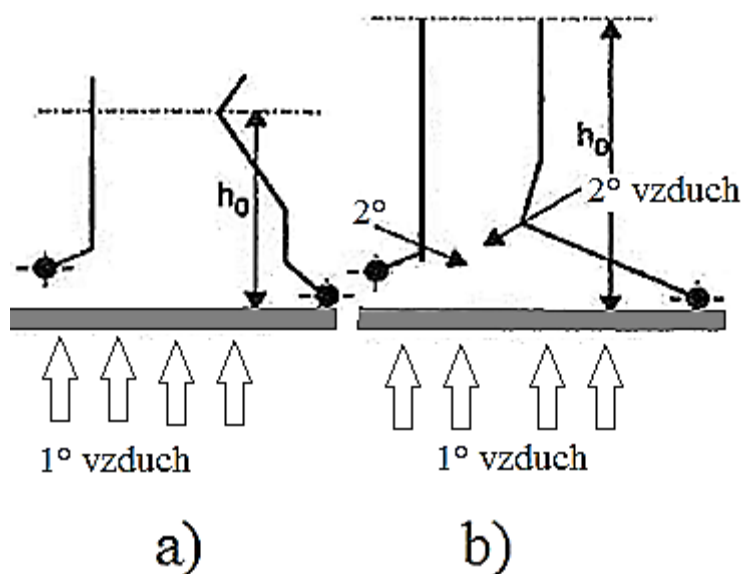
3.8.1 Roštová ohniště s jedním ohniskem hoření

- jsou vhodná pro pevná paliva s malým obsahem prchavé hořlaviny – černé uhlí, koks, antracit
- palivo hoří krátkým, nesvítivým, namodralým plamenem

- veškerý spalovací vzduch je přiveden pod rošt jako primární
- ohniště je nižší a širší díky krátké dráze plamene

3.8.2 Roštová ohniště se dvěma ohnisky hoření

- jsou vhodná pro pevná paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny – hnědé uhlí, lignit, rašelina, odpady, biomasa
- vysoká, seškracená ohniště pro dokonalé promíšení hořlaviny se vzduchem
- do seškraceného místa přiveden sekundární vzduch
- s rostoucí podílem prchavé hořlaviny roste podíl sekundárního vzduchu – u biomasy 50 – 70 %



Obrázek 3.3: Tvar roštového ohniště [5] a) s jedním ohniskem hoření
b) se dvěma ohnisky hoření

3.9 Spalování biomasy

U biomasy značně převyšuje podíl prchavé hořlaviny podíl hořlaviny fixní. Navíc je velká část prchavé hořlaviny tvořena nízkovroucími uhlovodíky, které se začínají rychle uvolňovat při ohřátí biomasy na přibližně 250 °C. K tomu musí být uzpůsoben i přívod spalovacího vzduchu. Pouze primární spalovací vzduch, přivedený pod spalovanou biomasu, není dostatečný, jelikož není možné kvalitně smíchat spalovací vzduch a uvolněnou prchavou hořlavinu. Nekvalitní promíšení by se projevilo vysokým obsahem nespálených uhlovodíků a CO ve spalinách, kondenzací uhlovodíku ve formě dehtu na chladnějších teplosměnných plochách a nízkou účinností zařízení. Proto je pro spalování biomasy využíván vícestupňový přívod vzduchu, jehož teplota závisí na vlhkosti paliva a přebytku vzduchu. Pod rošt je přivedena jen část spalovacího vzduchu. Na roštu dochází zejména k odplynění a pyrolýze a jen částečnému spálení paliva na CO. Větší část vzduchu je přiváděna ve vyšších částech ohniště jako sekundární,

popřípadě terciální vzduch. Tato část vzduchu je pomocí dýz přivedena mimo tuhou fázi paliva a je možné její kvalitní promíchání s produkty spalování na roštu. Nespálené uhlovodíky, produkty pyrolýzy i CO shoří a díky tomu dosahujeme vyššího stupně vyhoření paliva. Proto je geometrie spalovací komory na biomasu uzpůsobena delší době setrvání a vyhoření plyných produktů s minimálním odvodem tepla. Obzvláště jednotky nižších výkonů s chlazenou spalovací komorou jsou náchylné na snížení teploty v ohništi a kondenzaci uhlovodíku a tvorbu dehtových usazenin. Podíl primárního vzduchu, který spolu s palivem definuje výkon topeniště, k sekundárnímu vzduchu, který ovlivňuje jakost hoření a emisi škodlivin, se pohybuje u kusové biomasy 1:1 a u hrubozrnné biomasy až 1:2.

Při vyšší vlhkosti biomasy je vhodné využít předehřevu spalovacího vzduchu nebo recirkulace spalin a jejich přimíchání do primárního spalovacího vzduchu. Tyto zásahy zlepšují podmínky pro míšení okysličovadla s palivem a dokonalejší vyhoření a proto vedou ke snížení přebytku vzduchu, potřebného pro dokonalé spalování. Avšak přívod recirkulovaných spalin do primárního spalovacího vzduchu může způsobovat teplotní špičky a proto je třeba pečlivě sledovat užití v případě suchých paliv, jelikož roste pravděpodobnost tání popela.

3.10 Emise při spalování biomasy v roštových ohništích

Na množství emisí při spalování paliva mají vliv rozdílné technologie - konstrukce roštu, konstrukce ohniště i řídicí systém.

Emise CO velmi ovlivňuje konstrukce roštu samotného. Rošt musí být navržen tak, aby se v palivu nevytvářely krátery a mezery, tedy aby byl přívod primárního vzduchu rovnoměrně rozložen po celém roštu. Nevhodná distribuce primárního vzduchu může způsobit vyšší emise CO. Díky rovnoměrnému rozložení se okysličovadlo dostane k palivu. Také nestabilní řídicí systém může ovlivnit dobré výsledky, dané vhodnou koncepcí spalovacího zařízení. Stabilní řídicí systém může eliminovat špičky v tvorbě emisí. Předpokládá se, že s rostoucí kvalitou koncepce spalovacího zařízení klesá vliv špatného ovládání na úroveň emise CO.

Emise oxidu dusíku NO_x jsou ovlivňovány zejména obsahem dusíku v palivu a koncepcí spalovacího zařízení. Kvalitní řídicí systém může snížit počet teplotních špiček s vysokou emisí NO_x . Obecně je doporučován přívod recirkulovaných spalin pro efektivní regulaci teplot v ohništi a poskytuje základ pro efektivní rozdělení vzduchu a redukci NO_x .

3.11 Typy roštu - dle způsobu přemístování paliva

Z konstrukčního hlediska lze roštová ohniště rozdělit

3.11.1 Rošty s nehybnou vrstvou paliva – pevné rošty

- rošty mají značnou ztrátu mechanickým nedopalem v propadu, ve škváře i úletu

3.11.1.1 Pevný rovinný rošt

Nejstarší typ roštů v současné době používaný u malých kotlů pro lokální vytápění. Rošty jsou složeny z bezpropadových roštnic se spodním přívodem spalovacího vzduchu. Palivo je přiváděno na žhavou vrstvu, kde je spodním zápalem zažehnuto. Sušení paliva, vypařování vody, uvolňování prchavé hořlaviny i hoření fixního uhlíku zde probíhá téměř najednou. Nad pevný rošt je přiveden sekundární vzduch pro spálení uvolněné prchavé hořlaviny. Tyto rošty mají značnou ztrátu mechanickým nedopalem v propadu, ve škváře i úletu.

3.11.1.2 Pevný stupňový rošt

Stupňový rošt je tvořen řadou schodů, na kterých hoří palivo. Přikládání paliva a odvod škváry se odehrává sesouváním vlivem gravitace. Spalovací vzduch je většinou přiváděn regulačními otvory v čelech schodů mezi stupně roštu, na kterých leží palivo. Velikost a přesah jednotlivých stupňů se volí dle vlastností paliva. Rošty jsou vhodné pro paliva s vysokým obsahem prchavé hořlaviny, velkým množstvím prachových částic a paliva, schopná hořet ve vrstvě o značné tloušťce.

Rošty s přemístováním paliva – mechanické rošty

Rošty tohoto typu tvoří roštnice, kterými lze různými mechanismy pohybovat. Občasným, pravidelným nebo nepravidelným pohybem roštnic dochází k rozrušování spečené vrstvy paliva, promíchávání paliva, posunu a odvodu vyhořelého paliva z ohniště.

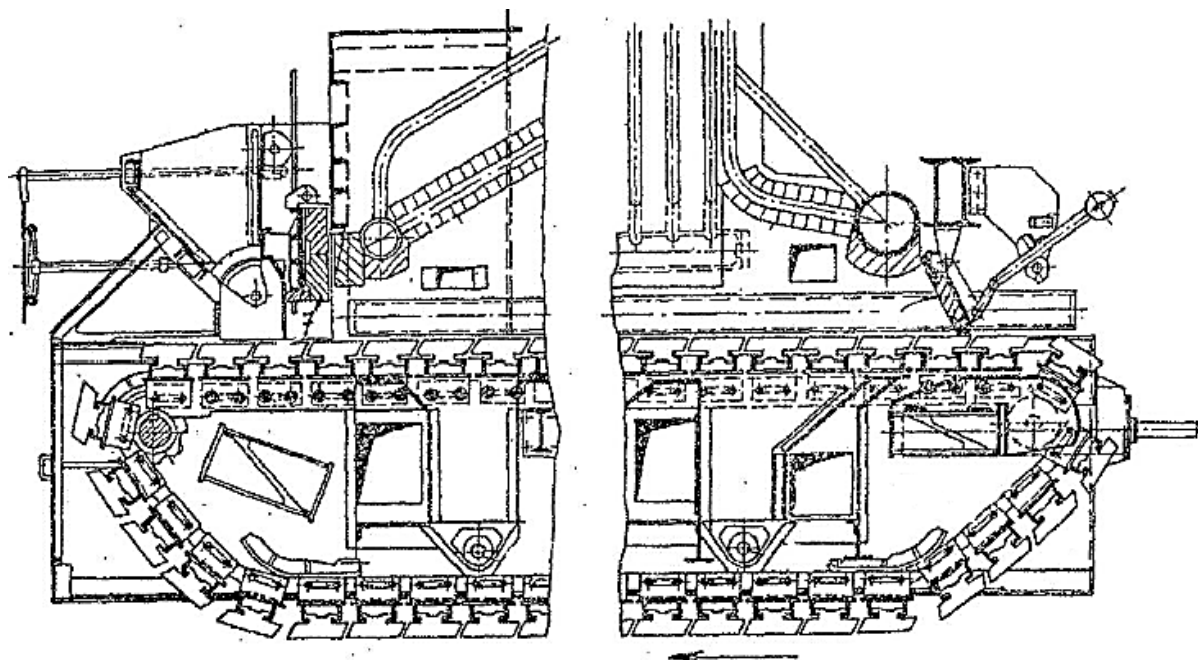
3.11.2 Rošty s trvalým přemístováním paliva

3.11.2.1 Rošty řetězové a pásové

Tyto rošty se skládají z nekonečného pásu, jehož vrchní plocha, na které se nachází vrstva paliva, tvoří rošt. Na roštu spalované palivo o výšce určené hradítkem se pohybuje od palivové násypky až k přepadu do škvárové jímky. V obou variantách je tepelně namáhána pouze horní část roštu, zatímco spodní část je chlazená. Díky tomu je možné užívat výhřevnější palivo bez rizika opalu roštnic.

Řetězový rošt představuje nekonečný řetěz, složený s články roštnic, které podpírají palivo a zároveň slouží k přenosu tažné síly pro pohyb roštu. Pásový rošt -

Obrázek 3.4 - má roštnice upevněny na příčných tyčích, které jsou poháněny dvěma řetězy, uloženými odděleně po stranách.



Obrázek 3.4: Pásový rošt [2]

3.11.3 Rošty s občasným přemísťováním paliva

3.11.3.1 Přesuvný rošt

Lze jej charakterizovat jako šikmý stupňový rošt, jehož roštová plocha je složena z úzkých roštnic, uspořádaných do vodorovných řad. Liché řady roštnic bývají obvykle připevněny k nosnému rámu a sudé řady roštnic jsou napojeny na vozíky. Ty jsou poháněny přímočaře vratně od klikového mechanismu elektromotorem nebo hydraulickým pístem. Povrch roštových stupňů je skloněn od vodorovné roviny. Posuvem roštnicových řad dosáhneme pozvolného sesouvání paliva, prolamování spečené vrstvy a částečně promíšení paliva ve vrstvě. Výkon roštu lze měnit výškou vrstvy paliva a rychlostí paliva – změnou rychlostí roštnic a také změnou délky posuvu roštnice. Je vhodný pro paliva s větším podílem prachových složek a paliva se sklonem k spékání.

3.11.3.2 Prohrábavací - vratisuvný rošt

Konstrukce těchto roštů je podobná roštům přesuvným, rozdílné jsou v tom, že se jednotlivé stupně pohybují proti pohybu paliva. Tím vznikají „smyčky“ a dochází k intenzivnějšímu míšení a spodnímu zápalu nezapálené části paliva od horní žhavé části paliva. Díky tomu je palivo zapáleno hned na začátku roštu a nejsou odděleny fáze sušení, uvolňování prchavé hořlaviny, hoření a dohořívání. Palivo se pohybuje po delší dráze a zůstává déle v ohništi.



Obrázek 3.5: Částečně vodou chlazený, prohrabávací rošt Vyncke [6]

3.11.3.3 Podsuvný – retortový rošt

Na tyto rošty viz Obrázek 3.6 je palivo přiváděno spodem retortou, ze které je vytlačováno a rozhrnováno po povrchu roštu. Spalování probíhá na povrchu vrstvy, kde naměříme nejvyšší teploty. Teplota klesá s rostoucí hloubkou. Vlivem vysoké teploty povrchu dochází ve vnitřních vrstvách k odplyňování a v nejnižších vrstvách k předsoušení paliva. Uvolněná prchavá hořlavina prostupuje vrstvou, dokud se na žhavém povrchu nevznítí. Primární vzduch je přiváděn pod palivo, a tudíž musí dosahovat vyššího tlaku, aby pronikl skrz vrstvu. Tento vzduch má vliv na množství úletu.



Obrázek 3.6: Retortový rošt [8]

3.12 Roštnice

Roštnice tvoří roštovou plochu, na které je spalováno palivo. U pevných roštů nesou palivo, u mechanických roštů navíc zajišťují dopravu paliva po roštu od palivové násypky ke škvárovému jízku. Dopravované palivo je u mechanických pásových roštů v klidu, u prohrabovacích roštů je za pohybu na roštu prohrabováno. Tvar roštnic musí být optimalizován pro dobré spalování paliva, dlouhou životnost a vyhovovat konstrukci roštu. Mezerami mezi roštnicemi proniká primární spalovací vzduch nezbytný pro spalování. Za studena je namáhání roštnic minimální, za provozu jsou značně namáhány opalem a prodloužením. Teplotu roštnic určuje zejména teplota ve vrstvě a tu ovlivňují vlastnosti paliva, výška vrstvy paliva, přebytek vzduchu a teplota vzduchu. Aby teplota roštnice příliš nevrostla, je nutné odvádět teplo a uzpůsobit tvar roštnic účinnému chlazení. Přirozenou ochranou roštnic proti sálání je vrstva škváry na roštu. Díky tomu nejsou k spalování na roštu vhodná paliva s nízkým obsahem popeloviny. Biomasa má nízký obsah popela a proto je nutné při jejím spalování činit speciální opatření na ochranu roštnic. Jsou to metody jako zvyšování přebytku vzduchu, vhodné rozložení teplot v ohništi, zvyšování obsahu popeloviny, chlazení roštnic parou, zlepšení materiálu a další. Tyto metody většinou zvyšují ztráty nebo způsobují růst nákladů na provoz, údržbu či nákup roštu. Moderní metodou je použití vodou chlazených roštů.

Životnost roštnic je ovlivněna materiálem. Pro teplotu do 600 °C lze užívat šedou litinu s nízkým obsahem legur jako mangan a chrom do 1 % a křemík do 6 %. Nárůstu žáruvzdornosti lze také docílit přidáním hliníku až 30 % a 16 – 18 % chromu.

3.12.1 Vzduchem chlazené roštnice

Roštnice chlazené vzduchem jsou běžné, velmi rozšířené řešení u roštových ohnišť. Tyto systémy jsou velmi spolehlivé s nízkými provozními náklady. Mají však i své nevýhody. Primární vzduch je zde užíván jako přívod okysličovadla k palivu, tak pro chlazení roštnic. Vzhledem k tomu, že používáme vzduch i jako chladicí médium roštnic, nelze optimálně řídit spalovací poměry v ohništi.

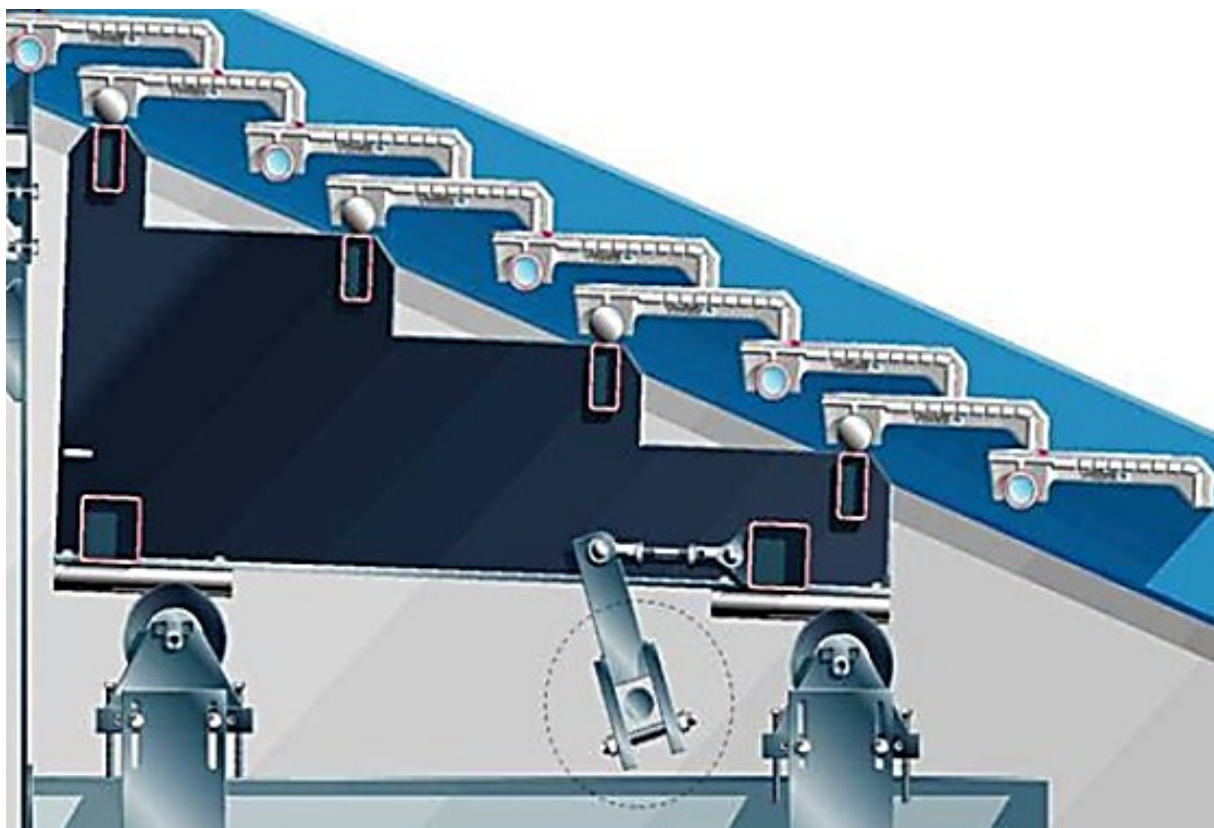
3.12.2 Vodou chlazené roštnice

Vodou chlazené roštnice odstraňují nevýhody vzduchem chlazených roštnic. Konstrukce roštu se skládá z dutých profilů, kterými proudí chladicí voda. Teplo z roštnic je nepřetržitě odváděno chladicí vodou a zabraňuje tak přílišnému ohřívání roštnic. Lze lépe regulovat množství spalovacího vzduchu pouze dle stechiometrie spalování bez ohledu na chlazení roštu. Zařízení má díky tomu vyšší účinnost, delší životnost, nižší emise a ztrátu teplem v tuhých zbytcích. Kromě toho jsou tyto rošty schopny pracovat s širším spektrem paliv. Teplo odvedené chlazením roštu, může být

použito pro předehřev napájecí vody roštu nebo v jiných technologických procesech. V případě, že pro toto teplo není využití, je odvedeno externím výměníkem tepla do okolí. Nevýhodou tohoto systému je značná složitost systému a závislost provozu na funkčnosti chlazení. Toto řešení zlepšuje spalovací podmínky, snižuje ztráty, je však náročnější z konstrukčního hlediska.

3.12.3 Pohyb roštnic a paliva

Funkcí pohyblivých roštnic je zajistit postup paliva na roštu, ale také rovnoměrné rozložení po šířce celého roštu. Roštnice jsou ukloněny ve směru pohybu paliva. Palivo, dávkované v horní části roštu, musí být mechanicky přemístěno do dolní části k odpopelnění apod. Pohyblivé řady roštnic se nacházejí vždy mezi dvěma po sobě následujícími řadami roštnic. Tyto pohyblivé roštnice jsou upevněny na vozík, který s nimi pohybuje tam a zpět. Vozík je poháněn hydraulickým pístem, který se nachází na vnější straně bočních stěn ohniště. Díky tomu je hydraulický píst izolován od vysokých teplot během spalování. Délku zdvihu a jeho rychlost je možno nastavit specificky pro každý vozík. K jednomu vozíku je připevněno několik pohyblivých řad roštnic. Každé pásmo přívodu primárního spalovacího vzduchu má vlastní vozík. Typ, velikost a vlhkost paliva definuje počet vzduchových pásem a vozíků stejně jako nastavení délky a rychlosti zdvihu. Průtok primárního vzduchu je regulován pomocí motorem poháněných klap a vháněn pod každou sekci roštu.



Obrázek 3.7: Systém pohybu FW roštnic [6]

3.13 Paliva, vhodná pro spalování na roštových ohništích

3.13.1 Fosilní paliva

Průmyslové spalování uhlí dříve nejrozšířenějšího tuhého paliva, je v současné době často nahrazováno spalováním biomasy a dále spalováním ušlechtilých paliv – plynu. Na roštech je možné spalovat rozdílné druhy uhlí, ale nejčastěji je používáno tříděné hnědé uhlí. Jedná se o snadno přístupné palivo za příznivou cenu. Černé uhlí, které má vyšší výhřevnost, nižší obsah prchavé hořlaviny a vyšší spalovací teplotu, se moc často nepoužívá, jelikož dochází k většímu tepelnému namáhání a opotřebení.

3.13.2 Uměle vyrobená paliva

Jde o paliva, která jsou vyráběna z přírodních těžných surovin nebo ze spalitelných odpadů – koks, uhelné brikety a pelety z biomasy. Koks, užívaný v hutnictví, se pro svou vysokou teplotu hoření a cenu k vytápění skoro nepoužívá. Brikety a pelety jsou lisované z uhlého prachu a různých vysušených spalitelných zbytků a surovin – rašeliny, slámy, pilin. Jsou to kvalitní paliva s vysokou výhřevností, srovnatelné s kvalitním hnědým uhlím.

Pro snadnou obsluhu jsou využívány v domácnostech a kotlích nižších výkonů pro vytápění staveb. Jejich vyšší cena omezuje využití v průmyslových topeništích větších výkonů.

3.13.3 Komunální a průmyslový odpad

Roštová ohniště lze využívat i pro spalování komunálních a průmyslových odpadů. Z pohledu spalovacího procesu se nejedná o ideální palivo, neboť jejich výhřevnost i obsah vody velmi fluktuuje. Při spalování odpadů vznikají nebezpečné zplodiny. Emisní limity jsou k zařízením spalující odpad výrazně přísnější, než pro běžné zdroje znečištění a proto je jejich provoz velmi nákladný.

3.13.4 Biomasa

Zdrojem energeticky využitelné energie je i sluneční energie, uložená v organických materiálech – biomasa. Obecně lze biomasu definovat jako všechny organické materiály a obnovitelné suroviny rostlinného nebo živočišného původu, určené pro průmyslové využití. Biomasa je pro svou obnovitelnost považována za jeden z nejperspektivnějších zdrojů energie. Spalováním biomasy se stejně jako u spalování jiných paliv uvolňuje oxid uhličitý. Oproti spalování fosilních paliv má spalování biomasy v podstatě nulovou (neutrální) bilanci oxidu uhličitého a tak nezatěžuje životní prostředí. Spalováním biomasy se produkuje oxid uhličitý, ale přibližně stejné množství je spotřebováno fotosyntézou při růstu rostliny. Spalování biomasy je velice komplikované, neboť podíl prchavé hořlaviny je velmi vysoký a vzniklé plyny mají

různé spalovací teploty. Podmínkou dokonalého spálení je vysoká teplota, účinné směšování se vzduchem a prostor dostatečný k tomu, aby všechny plyny vyhořely.

3.14 Společnost Vyncke

Vyncke je rodinná společnost, která byla založena roku 1912 v Belgii. Od té doby dosáhla postavení jednoho ze světových hráčů na trhu v technologiích výroby čisté energie; především v oblasti energetických zdrojů o výkonu 1-100 MW, vyrábějících energii spalováním biomasy a odpadů. Silnou stránkou firmy jsou zákaznická řešení šitá přímo na míru konkrétním podmínkám a potřebám.

Průmyslové odvětví

Paliva využívána v kotlích

- dřevní odpad
- pelety
- sláma z obilnin
- kukuřičné klasy
- odpadní papír
- rýžové lusky
- slunečnicové a olivové slupky
- kávová sedlina
- a další

Energie může být transformována jako

- teplá a horká voda
- pára a přehřátá pára
- ohřáté plyny
- kombinace systémů

4 Návrh a konstrukce zkušebního testovacího zařízení

Tato kapitola práce se věnuje návrhu testovacího zařízení.

Navrhované zařízení má sloužit k lepšímu popisu interakce mezi proudem primárního spalovacího vzduchu, spalovacím roštem a vrstvou paliva na částečně vodou chlazených, prohrabávacích roštech - Obrázek 3.5. a plně vodou chlazených roštech - Obrázek 4.1 Tyto kotle jsou určeny zejména ke spalování biomasy. Testovací zařízení by mělo využívat identické roštnice - Obrázek 4.2 a Obrázek 4.3. Konstrukčně by mělo být co nejpodobnější kotlům Vyncke, ale zjednodušeně řešené.



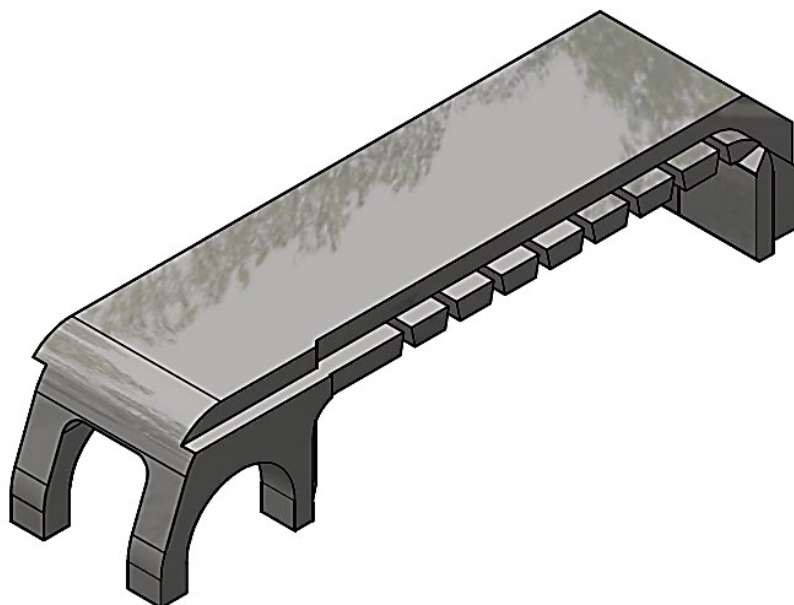
Obrázek 4.1: Plně vodou chlazený, prohrabávací rošt Vyncke [6]

4.1 Návrh koncepce zařízení

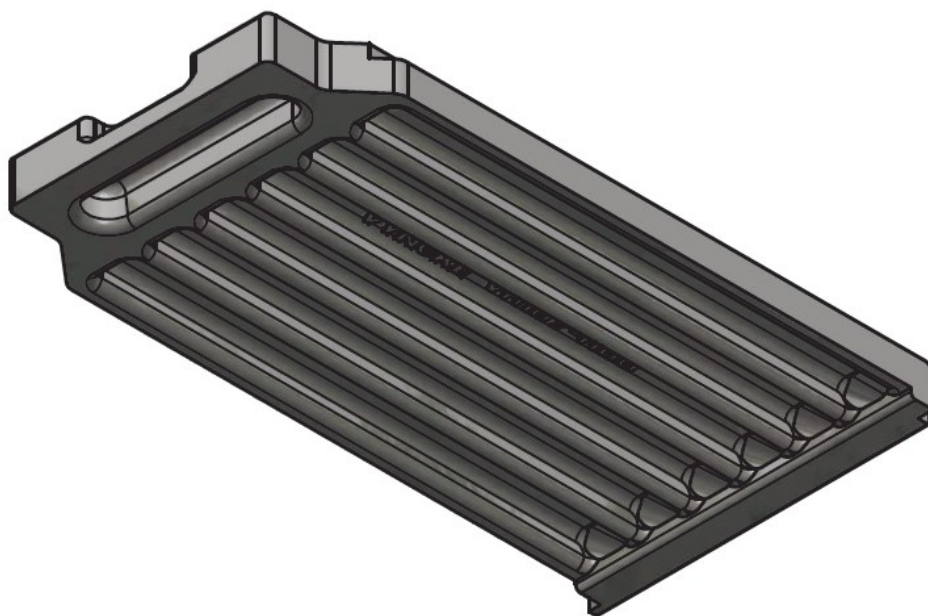
Požadavek a) Použití standartních roštnic

- částečně vodou chlazené – semi water cooled (SW) - Obrázek 4.2

- plně vodou chlazené – fully water cooled (FW) - Obrázek 4.3



Obrázek 4.2: Roštnice z částečně vodou chlazeného roštu - semi water cooled (SW) [6]



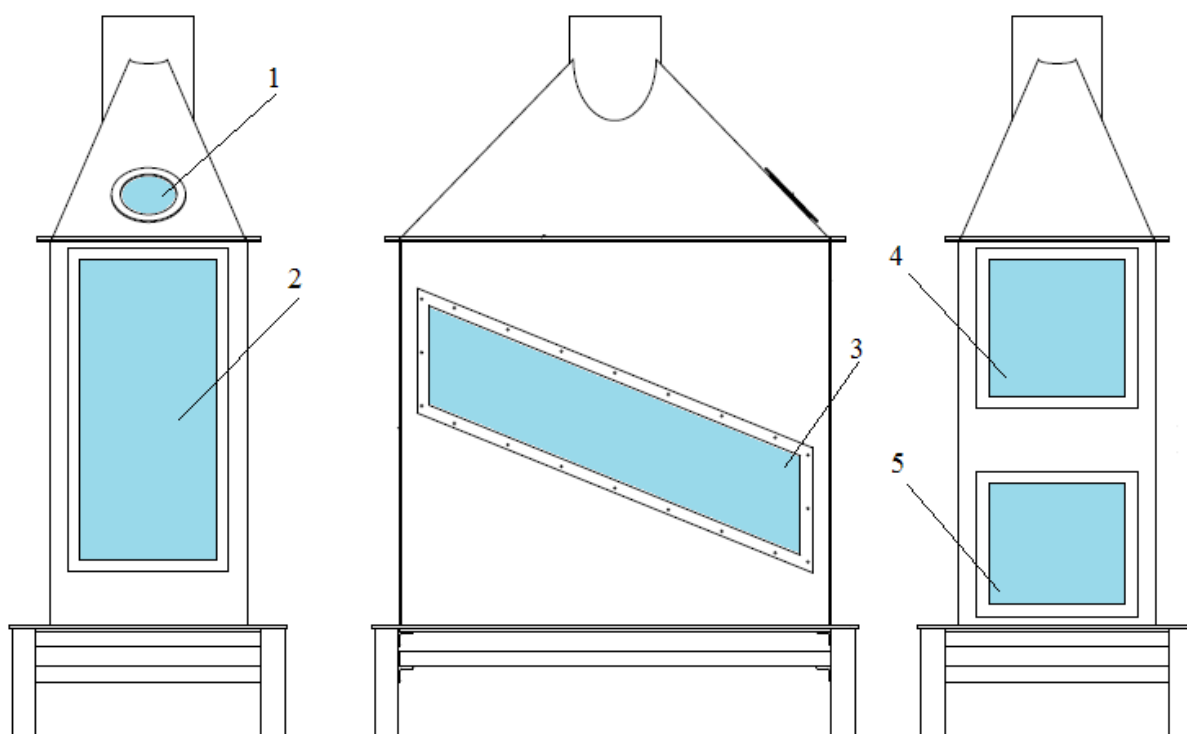
Obrázek 4.3: Roštnice z plně vodu chlazeného roštu - fully water cooled (FW) [6]

Původně plánovaný požadavek na zařízení umožňující testování obou typů roštnic SW a FW či dvou zařízení, se během vypracování mé diplomové práce změnil a bylo postaveno zařízení jen pro test SW roštnic. Realizace dalšího zařízení se bude odvíjet od zařízení, které jsem navrhl a dosažených výsledků práce.

Požadavek **b) Umístění plexiskla na stěnách testovacího zařízení**

Po stranách testovacího zařízení je připevněno plexisklo, které umožní pozorování pohybu paliva na roštu, zarovnání vrstvy paliva, výšku paliva, úlet částic paliv a proudění vzduchu skrz vrstvu paliva.

Části z plexiskla jsou zobrazeny modře - Obrázek 4.4. Položky č. 1 a č. 3 tvoří napevno připevněné desky z plexiskla a položky č. 2, 4 a 5 tvoří otevíratelné dvířka. Kulatý otvor č. 1 v horní části slouží umístění lampy a zlepšení viditelnosti - Obrázek 4.5. Dvířka č. 2 a 4 slouží k dávkování a manipulaci s palivem a roštnicemi. Dvířka č. 5 slouží ke kontrole polohy pohyblivých řad roštu. Deska z plexiskla č. 3 je určena k pozorování pohybu paliva při posunu roštnic a kontrolu úletu nejjemnější frakce.



Obrázek 4.4: Umístění plexiskla na testovacím zařízení

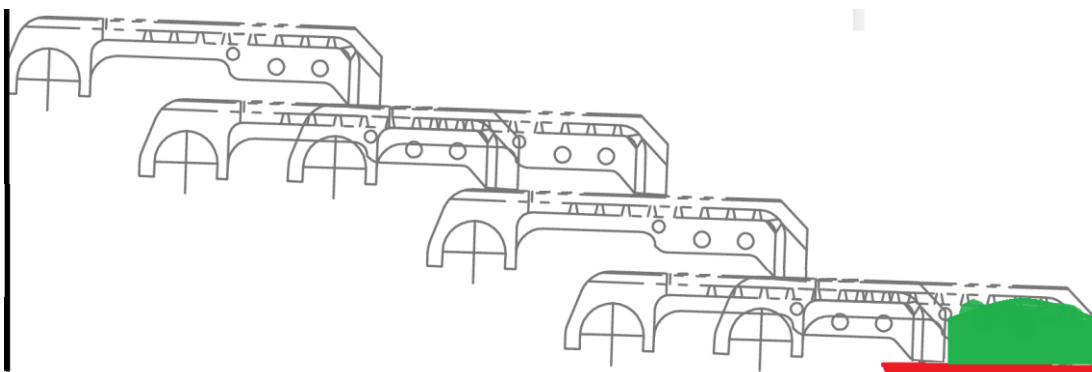


Obrázek 4.5: Halogenová lampa umístěna v horní části zařízení [7]

Požadavek **c) Testovací zařízení bude obsahovat minimálně 2 řady pevných roštnic a 2 řady pohyblivých roštnic**

Kdybych použil minimální počet roštových řad – celkem 4 (2 fixní a 2 pohyblivé řady) mohlo by uspořádání roštových řad být následující:

1) fixní – pohyblivá – fixní - pohyblivá

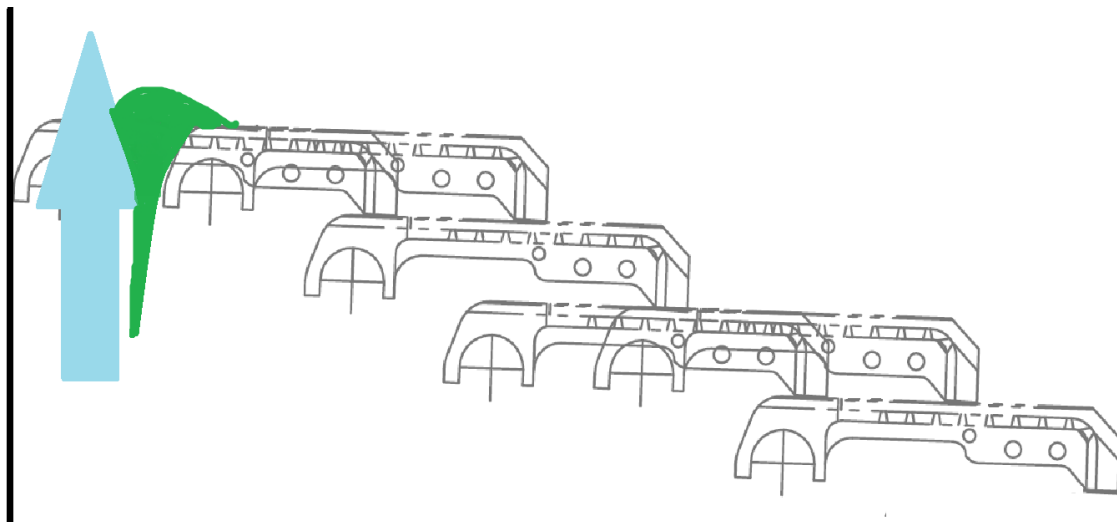


Obrázek 4.6: Uspořádání roštových řad: fixní – pohyblivá – fixní – pohyblivá

U tohoto uspořádání by způsobovala problémy pohyblivá řada roštnic dole, vpravo - Obrázek 4.6. Bylo by nutné pro podporu jejího konce ve všech polohách instalovat plech (znázorněn červeně), který by ovlivňoval proudění vzduchu skrze spodní roštovou řadu. V poloze, kdy je tato řada přisunuta ke stěně, by skrz roštnice

neproudil vzduch a v opačné poloze by se do prostoru mezi čelem roštnic a stěnu dostávalo palivo (znázorněno zeleně) a způsobovalo potíže při pohybu roštu.

2) pohyblivá – fixní – pohyblivá – fixní

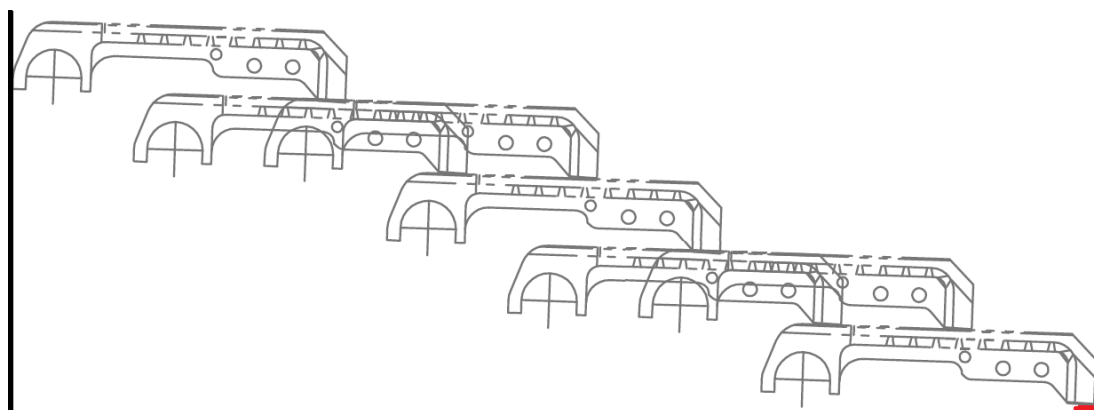


Obrázek 4.7: Uspořádání roštových řad: pohyblivá – fixní – pohyblivá - fixní

U tohoto uspořádání by způsobovala problémy pohyblivá řada roštnic nahoře, vlevo - Obrázek 4.7. V poloze, kdy je tato řada odsunuta od stěny, vznikne mezi stěnou a roštnicí volná mezera. Touto mezerou by volně proudil vzduch mimo rošt (znázorněno modře) a dále by touto mezerou propadávalo dolů palivo (znázorněno zeleně).

Výše zmíněné problémy jsem vyřešil umístěním 5 roštových řad - Obrázek 4.8 v následujícím uspořádání: fixní – pohyblivá – fixní – pohyblivá – fixní řada.

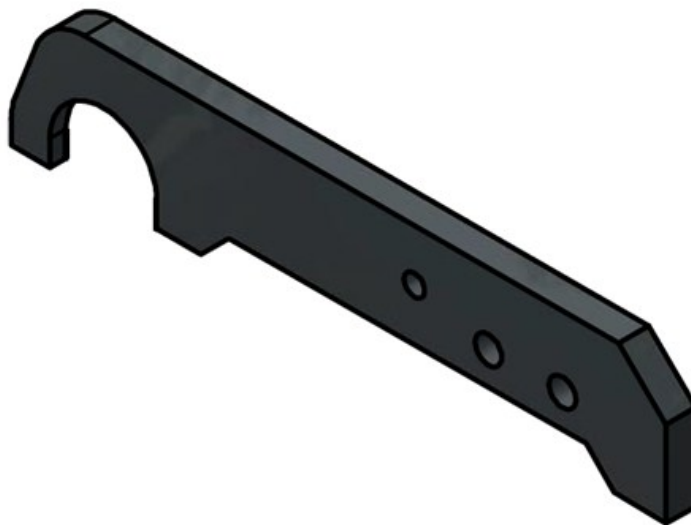
Fixní roštová řada, umístěná nahoře je stále v poloze u stěny a nedochází tak k problémům s propadem paliva a prouděním mimo roštnice - Obrázek 4.7. Fixní roštová řada umístěná dole je podpírána plechem (zobrazen červeně) pouze v krajní části a neovlivňuje tak proudění - Obrázek 4.6.



Obrázek 4.8: Uspořádání roštových řad: fixní – pohyblivá – fixní – pohyblivá – fixní

Požadavek **d) Každá roštová řada musí obsahovat nejméně 3 roštnice**

Roštnice FW jsou široké 200 mm, roštnice SW 100 mm. Z tohoto pravidla vyplývá minimální šířka testovacího zařízení, dovolující instalaci 3 roštnic FW a 6 roštnic SW. Jak bylo vysvětleno v bodě a) této kapitoly zařízení na FW roštnice realizováno nebylo, ale rozměr stanovený dle těchto roštnic byl zachován. Roštnice SW jsou na své pravé straně vybaveny zámkem, který zapadá do vedlejší roštnice. Tento zámek je konstruován tak, aby byla vymezena minimální vzdálenost mezi jednotlivými roštnicemi a byl tak umožněn průchod vzduchu touto mezerou. Na pravé straně zařízení byla vedle šesti SW roštnic umístěna speciální krajní (ukončovací) roštnice - Obrázek 4.9, do které zapadne zámek vedlejší roštnice. Tato roštnice dosedá celou plochou na boční stěnu ohniště. V mém případě bylo oproti reálné roštové řadě navíc použito vymezovací roštových plechů - Obrázek 4.10. Tyto ocelové plechy tvaru roštnice o šířkách 4, 6 a 8 mm slouží k vyplnění mezery mezi boční roštnicí a stěnou zařízení. Jejich přínosem je možnost simulace stavu, kdy dochází k roztahování roštnic vlivem rostoucí teploty, také jsou využívány pro sestavování a rozebírání roštnicových řad.

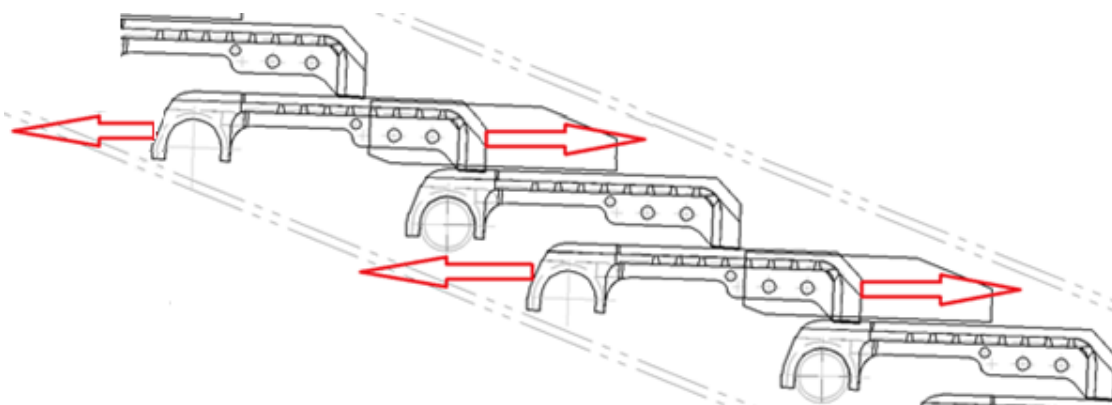


Obrázek 4.9: Krajní SW roštnice [6]



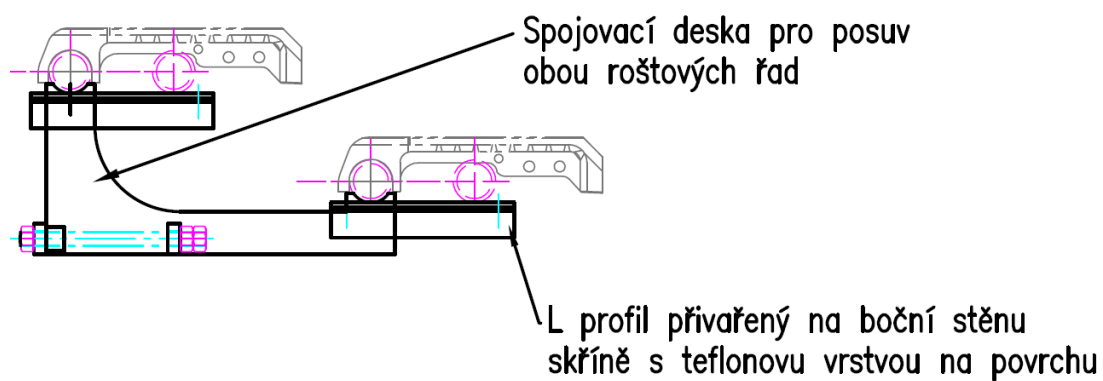
Obrázek 4.10: Vymezovací plech [7]

Požadavek e) **Pohyblivé řady budou navrženy tak, aby bylo možné s roštnicemi pohybovat, jako je tomu u skutečných roštnic**

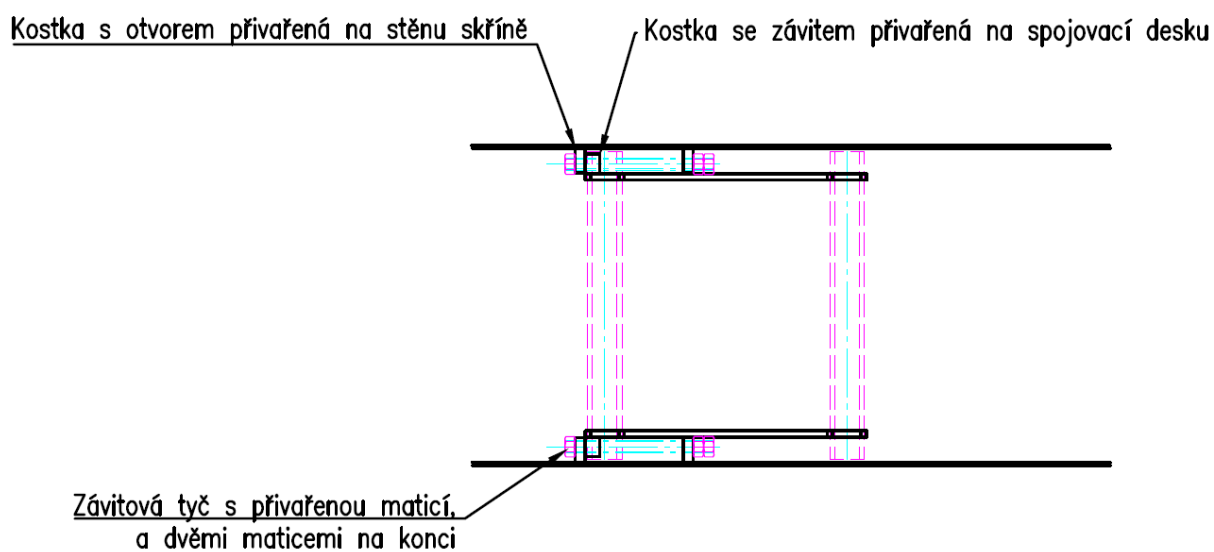


Obrázek 4.11: Pohyb SW roštnic

Pohyb roštnic musel být navržen tak, aby bylo možné pohybovat s roštnicemi nesoucími palivo, bez nutnosti manipulace s palivem. Pro současný pohyb obou řad bylo zapotřebí řady spojit pomocí spojovací desky. Otáčivý pohyb šroubu způsobuje pomocí kostek pohyb řad dopředu a dozadu. Spojovací deska posouvá kulatinu, nesoucí roštnice po L profilech přivařených na boční stěnu zařízení. Na povrchu L profilu je pro snížení tření přišroubována 8 mm vysoká teflonová vrstva. Tento mechanismu pohybu znázorňuje Obrázek 4.12 a Obrázek 4.13. Šroubový pohyb a tedy pohyb roštnic je vyvoláván ručním točením klikou, která byla dodatečně přivařena na závitovou tyč - Obrázek 4.14 a Obrázek 4.15.



Obrázek 4.12: Mechanismus pohybu roštnic - boční pohled



Obrázek 4.13: Mechanismus pohybu roštnic - horní pohled



Obrázek 4.14: Původní systém posuvu roštnic [7]



Obrázek 4.15: Vylepšený systém - klika pro posun roštnic [7]

Požadavek **f) Možnost měřit tlakovou ztrátu samotného roštu a také roštu s palivem**

Konstrukce zařízení musela umožnit možnost manipulace s palivem. Vzhledem k tomu, že roštová plocha je téměř 1 m^2 velká a požadované vrstvy paliva jsou 10, 20 a 30 cm bylo zřejmé, že objemy paliv budou vysoké. S palivem bude manipulováno při otevření dvířek - Obrázek 4.4 – konkrétně položky č. 2 a č. 4. Pro zajištění stejných vstupních podmínek je použito hradítko. Toto hradítko slouží k urovnání vrstvy paliva na roštu a přesnému nastavení vrstvy paliva a tedy množství nadávkovaného paliva. Výška vrstvy lze regulovat na samotném hradítku - Obrázek 4.16, Obrázek 4.17 a Obrázek 4.18.



Obrázek 4.16: Hradítko nastaveno na zarovnání 10 cm vrstvy paliva [7]



Obrázek 4.17: Hradítko nastaveno na zarovnání 20 cm vrstvy paliva [7]



Obrázek 4.18: Hradítko nastaveno na zarovnání 30 cm vrstvy paliva [7]

Hradítkem je urovnána vrstva ve směru daném „kolejnicemi“, které jsou přivařeny na boční stěny zařízení nad plexisklem, umožňujícím pozorování pohybu paliva. Směr „kolejnic“ je rovnoběžný s myšlenou přímkou protínající povrch fixních roštnic a pohyblivých roštnic, nastavených do střední polohy.

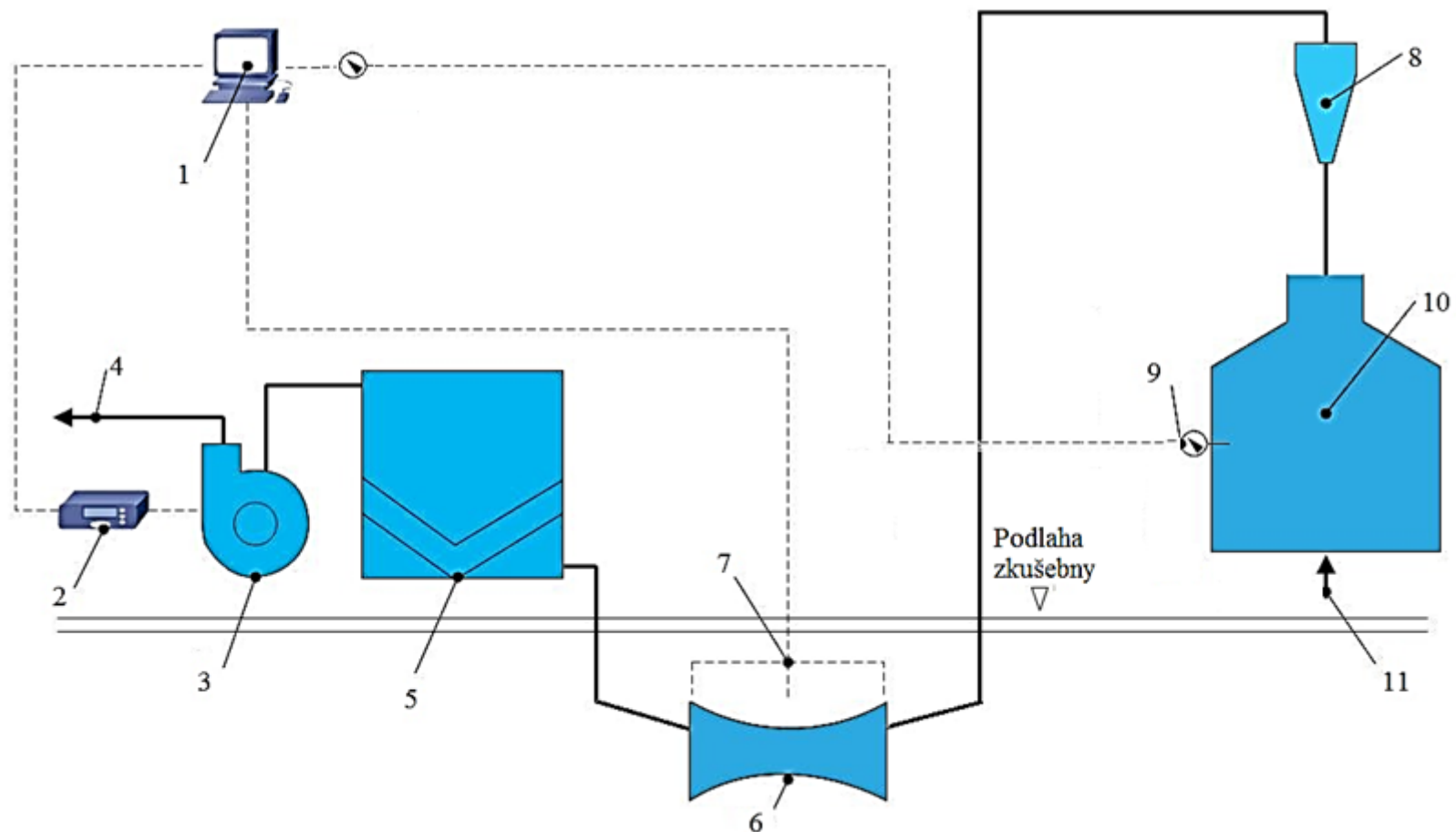
Požadavek **g) Navrhnout přívod a odvod vzduchu simulující proudění primárního spalovacího vzduchu**

Pro simulaci proudění vzduchu skrz rošt bylo možné zvolit systém tlakový nebo podtlakový. Vzhledem ke granulometrii paliva a umístění zařízení byl zvolen systém podtlakový, které je vhodnější pro zachování čistého prostředí testovacího zařízení. Vzduch je nasáván ventilátorem a proudí přes rošt, pod kterým je atmosférický tlak a dostatek prostoru neomezující proudění vzduchu.

Požadavek **h) Navrhnout napojení měřícího zařízení na ventilátor a cyklon potřebný k odloučení jemných částic paliva z proudu vzduchu**

Testovací zařízení je ukončeno vyústěním, na které je napojena flexibilní transparentní hadice o průměru 300 mm. Flexibilní hadice je napojena na cyklon, který může být pomocí přemostění zapojen či odpojen dle chování měřeného paliva. Z cyklónu je vzduch veden opět pomocí flexibilních hadic do potrubí, které vzduch vedou do Venturiho trubice, určené k měření průtoku vzdušiny. Poté vzduch proudí přes vyřazený filtr do ventilátoru, který vyhání vzduch mimo prostor zkušebny otvorem ve stěně.

Poznámka: Testovací zařízení je provozováno na zkušebně Výzkumného energetického centra. Využívá zmodifikovanou část měřící tratě, určenou pro ověření způsobilosti k měření emisí. Více informací - [12].



Obrázek 4.19: Schéma testovací trati

1. PC – sběr dat, teplota a tlak okolí
 5. Nevyužívaný filtr
 9. Měření tlaku nad roštem

2. Frekvenční měnič
 6. Venturiho trubice
 10. Měřicí stand

3. Ventilátor
 7. Měření diferenčního tlaku
 11. Vstup vzduchu

4 Výstup vzduchu ze ventilátoru
 8. Cyklon

Fotografie navrženého testovacího standu na zkušebně Výzkumného energetického centra - Obrázek 4.20. Stand byl vyroben z části v Belgii a z části v České republice.



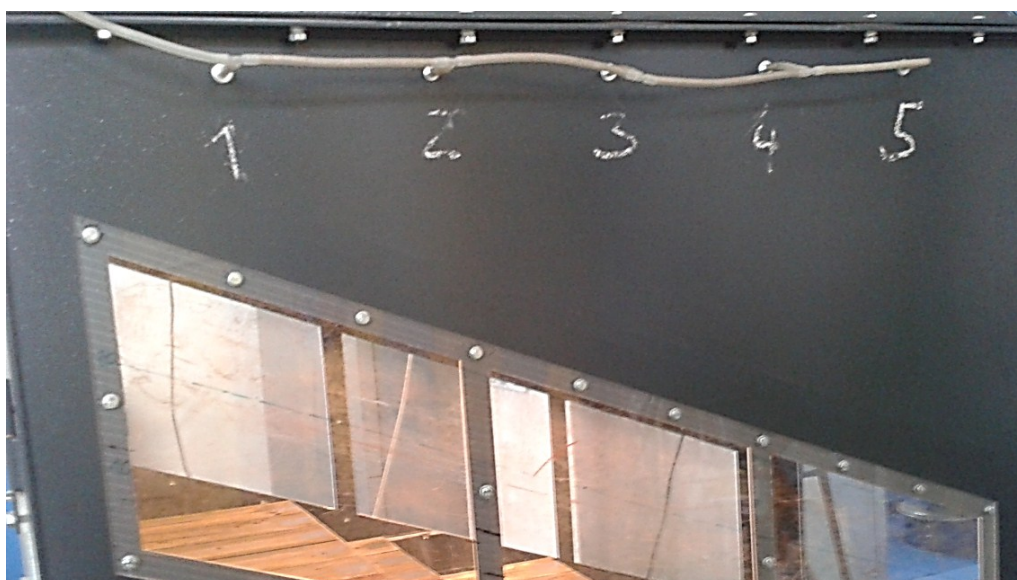
Obrázek 4.20: Měřicí stand [7]

Požadavek j) **Stanovit umístění měřících bodů a určit typ měřícího přístroje**

Pod roštem měřícího zařízení je uvažován barometrický tlak. Je tedy měřen tlak nad roštem a tlaková diference mezi barometrickým tlakem a tlakem změřeným vyjadřuje pokles tlaku vlivem průtoku přes rošt, popřípadě přes rošt a vrstvu paliva. Rovnoměrně po délce roštu je umístěno 5 měřících trubic - Obrázek 4.21. Tyto trubice vedou přes celou šířku roštu a jsou navrtány v 5 bodech - Obrázek 4.22. Všechny trubice jsou pomocí plastových hadiček svedeny do jedné a ta je připojena k diferenčnímu tlakoměru. Během měření bylo zjišťováno, zda má počet a umístění měřících trubiček vliv na měřenou tlakovou ztrátu. Při konstantním průtoku $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$ byly postupně zapojovány jednotlivé měřící body a odečtena tlaková ztráta pro danou měřící trubičku. Výsledné hodnoty - Tabulka 4.1 ukázaly, že pozice a počet zapojených měřících trubiček nemají podstatný vliv na tlakovou ztrátu a proudění vzduchu je již v dané výšce nad roštem homogenní.

Měřicí bod číslo	1.	2.	3.	4.	5.
Tlaková ztráta (Pa)	234	236	234	237	234

Tabulka 4.1: Hodnoty při zapojení jednotlivých měřicích bodů



Obrázek 4.21: Umístění měřicích bodů (pohled z boku) [7]



Obrázek 4.22: Měřicí body (pohled zevnitř) [7]

5 Měřicí zařízení

5.1 Venturiho trubice

Byla použita k měření průtoku vzduchu o teplotě okolí. Konkrétně byla zařazena mezi cyklon a filtr.

Venturiho trubice je založena na principu měření průtoku pomocí diferenčního tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru. Její funkci popisuje Bernoulliho rovnice. Jedná s o vztah, popisující tlakové poměry během proudění v potrubí. Vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění tekutiny, dle kterého při stálých podmínkách tlak v tekutině klesá s nárůstem rychlosti jejího proudění. Skutečnost, že s rostoucím průřezem potrubí klesá rychlost kapaliny, vychází z rovnice kontinuity. Ke zmenšení průtočného průřezu dojde, pokud do potrubí vložíme jakoukoliv překážku. Průchodem tekutiny přes překážku dojde k nárůstu rychlosti, respektive kinetické energie a poklesu statického tlaku tekutiny – potenciální energie.

Venturiho trubice se skládá ze vstupního kuželovitého konfuzoru, který je připojen k válcovitému hrdlu, pokračující kuželovitě rozšiřující se částí tzv. difuzorem. V zúženém místě vzroste rychlost proudění média a vznikne tlaková diference. Následně se v difuzoru tlak vrací na hodnotu původní sniženou o trvalé tlakové ztráty. Jedná se o velmi přesné měřicí zařízení charakteristické trvale nízkou tlakovou ztrátou, vyššími investičními náklady, avšak díky dobré samočisticí schopnosti je její provoz a údržba jednodušší.

Rovnice (1) popisující rychlost proudění tekutiny

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

Kde	v	rychlost proudění tekutiny [m/s]
	k	konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtoku [1]
	Δp	díferenční tlak [Pa]
	ρ	hustota tekutiny[kg/m ³]

Parametry Venturiho trubice

Typ odběru:	prstencový
Kalibrovaný rozsah:	600 – 6 000 m _n ³ /h
Vnitřní průměr potrubí:	315 mm
Stavební délka:	1 300 mm



Obrázek 5.1: Venturiho trubice [7]

5.2 Cyklon

Cyklon byl zařazen za testovacím standem před Venturiho trubicí. Vzhledem k jeho značné tlakové ztrátě byl připojován dle potřeby a chování paliva.

Cyklony jsou nejrozšířenějším mechanickým odlučovačem dosahující vysoké účinnosti při nízkých investičních a provozních nákladech. Slouží k odstranění jemné a nelepivé frakce z odsávané vzdušiny. Svou konstrukcí je určen jako předfiltrace pro filtrační zařízení a odsávací zařízení. V cyklonovém odlučovači je proud vzdušiny s obsahem pevných částic udělena rotace tak, že pevné částice rotují vysokou rychlostí po obvodu pláště, dokud vlivem odstředivé síly a gravitace nejsou odloučeny.



Obrázek 5.2: Cyklon a jeho napojení [7]

5.3 Snímače diferenčního tlaku

Snímač tlaku Cressto slouží k měření diferenčního tlaku roštu, popřípadě roštu s palivem. Tlak nad roštem je měřen pomocí 5 trubiček rovnoměrně umístěných nad roštem. Každá trubička má 5 otvorů po své délce. Tlakový snímač Yokogawa slouží k měření diferenčního tlaku na Venturiho trubici a určení průtoku.

Výrobce: Cressto
Typ: DMVG 328N4G
Rozsah: 10^3 (jednotky kPa)



Obrázek 5.3: Snímač tlaku Cressto [7]

Výrobce: Yokogawa
Typ: EJX910A
Rozsah: 0 - 150 kPa

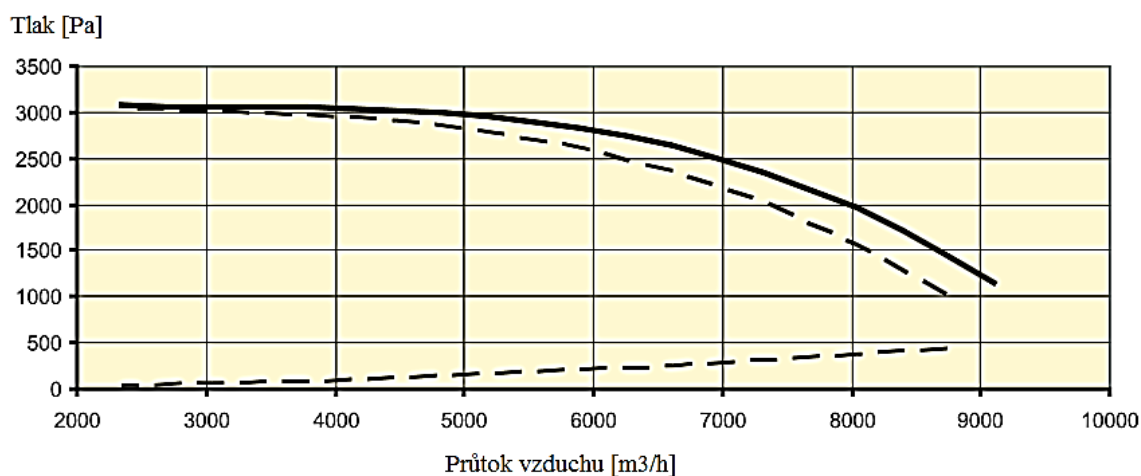


Obrázek 5.4: Snímač tlaku Yokogawa [7]

5.4 Ventilátor

K dopravě vzduchu měřicí tratí slouží radiální ventilátor firmy Nedermann NFC 80/20 50 Hz.

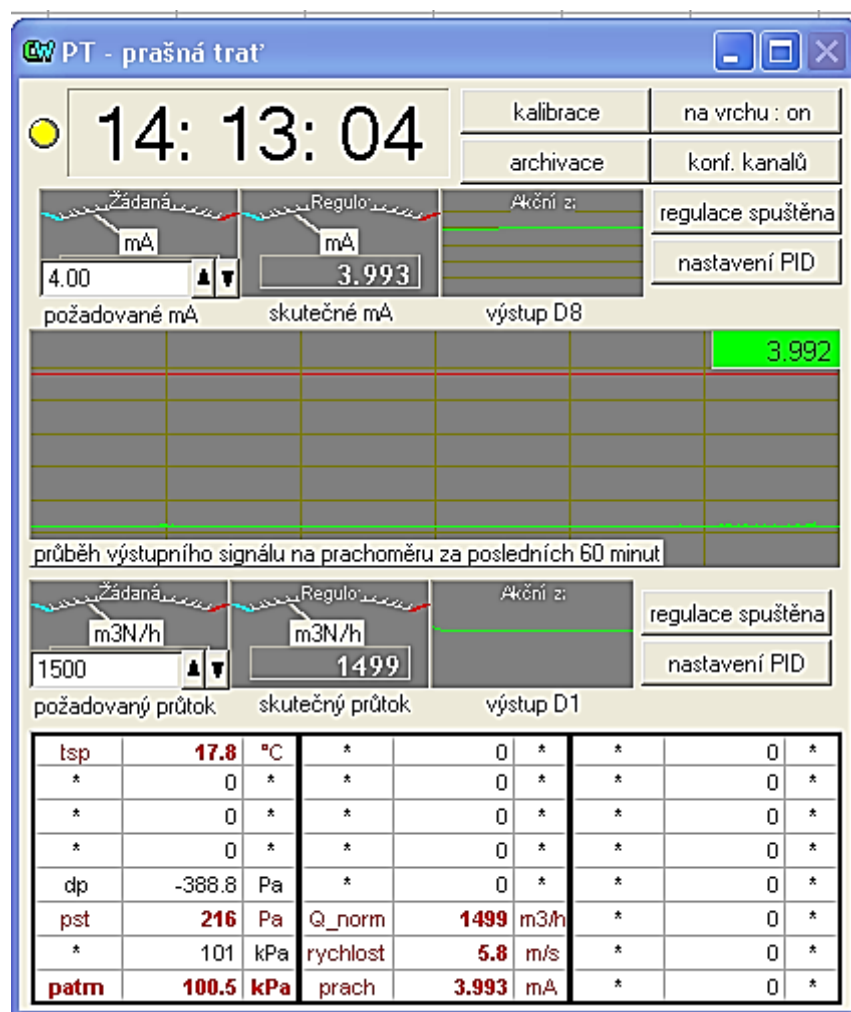
Kapacita:	2300-9100 m _n ³ /h
Celkový tlak:	3070-1150 Pa
Výkon motoru:	7,5 kW
Otáčky:	2930 otáček za minutu
Frekvence:	50 Hz
Hmotnost:	150 kg



Obrázek 5.5: Charakteristika ventilátoru Nedermann NFC 80/20 50 Hz [11]

5.5 Obecný popis měření

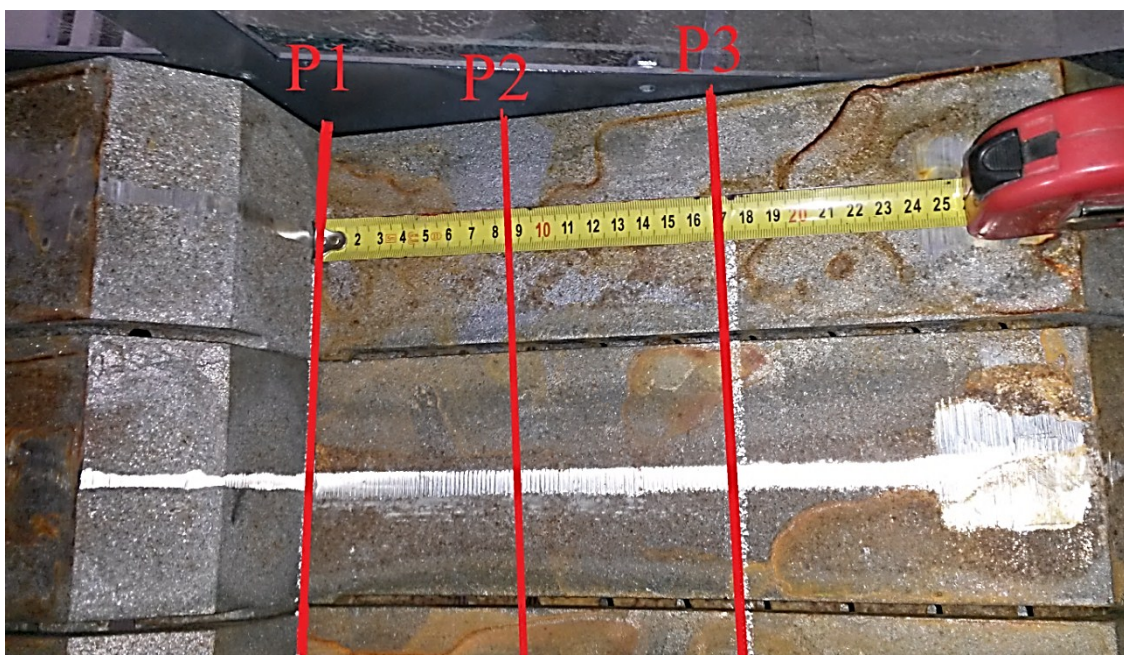
Při prvních orientačních měřeních byly stanoveny základní průtoky, pro které bude měření prováděno 500, 1000, 1200, 1500 m_n³/h a maximální dosažitelná hodnota při dané konfiguraci. Po zahájení měření byla zjištěna tlaková odchylka na měření průtoku Venturiho trubicí a veškeré průtoky byly přepočítány. Výsledné hodnoty, pro které bylo měření provedeno, jsou po přepočtu následující: 658, 1088, 1274 a 1560 m_n³/h. Pátou měřenou hodnotou je maximální možný průtok při dané konfiguraci. Těchto pět průtoků je dostatečné množství pro získání představy o chování tlakové ztráty. Tyto průtoky budou měřeny u všech paliv, pokud nebude docházet k zvýšenému úletu částic paliva či pohybu vrstvy. Roštová plocha je má obsah přibližně 1 m². Hodnota 1274 m_n³/h je nejbližší hodnotě, která se reálně používá na kotlích Vyncke.



Obrázek 5.6: Ovládací rozhraní ventilátoru [7]

Rošt se skládá z 5 řad, z toho jsou dvě řady pohyblivé. Těmito řadami lze pohybovat dopředu a zpátky. Celkový rozdíl roštové řady při vysunutí a zasunutí je 170 mm. Všechna měření budou opakována ve 3 různých polohách roštu – P1, P2, P3 - Obrázek 5.7. První měřenou polohou je poloha, kdy jsou pohyblivé roštnice úplně zasunuty (P1). Další polohou je střední pozice, kde jsou pohyblivé roštnice vysunuty z poloviny možného pohybu tzn. polovina ze 170 mm, tedy 85 mm (P2). Poslední polohou je koncová pozice roštové řady, kdy jsou roštnice vysunuty úplně (P3).

Cyklon je připojován a odpojován dle aktuální potřeby. Pokud nedochází k úletu částic z roštu, je cyklon vyřazen. Na samotné měření tlakové ztráty nemá zapojení cyklónu vliv, jelikož je zařazen až za měřicími body. Jeho použití však ovlivňuje maximální dosažitelný výkon ventilátoru.



Obrázek 5.7: Možné polohy pohyblivé roštnice [7]

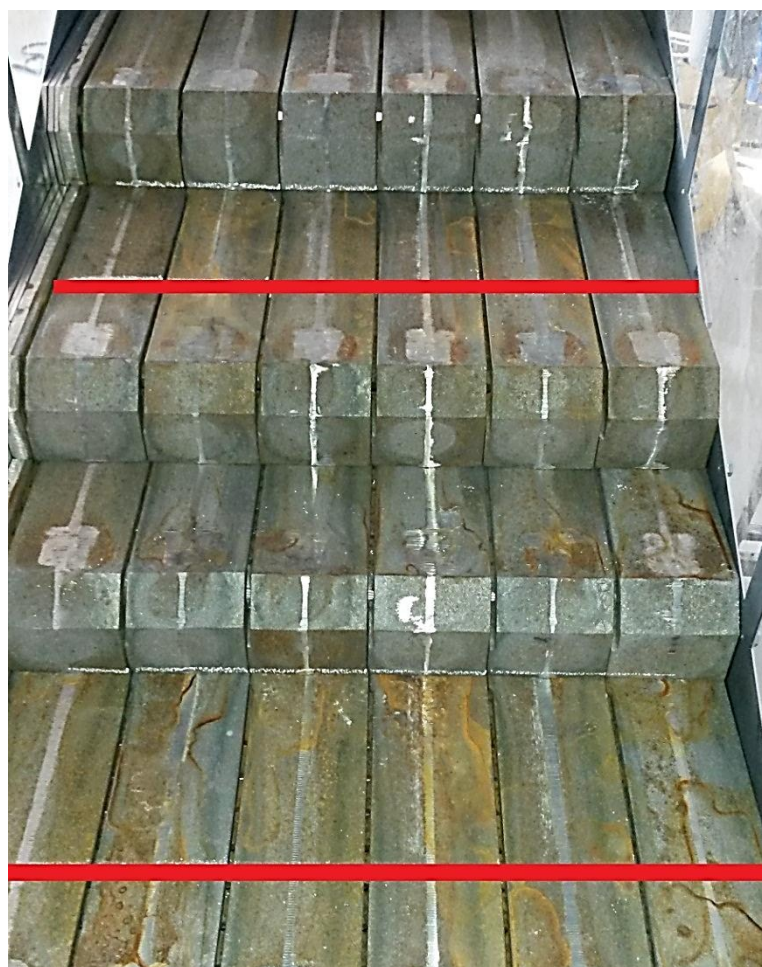
6 Tlaková ztráta – měření bez paliva, metodika měření

6.1 Měření samostatného roštu

Proměření prázdného roštu je základní měření, nutné pro další pokračování

Postup měření:

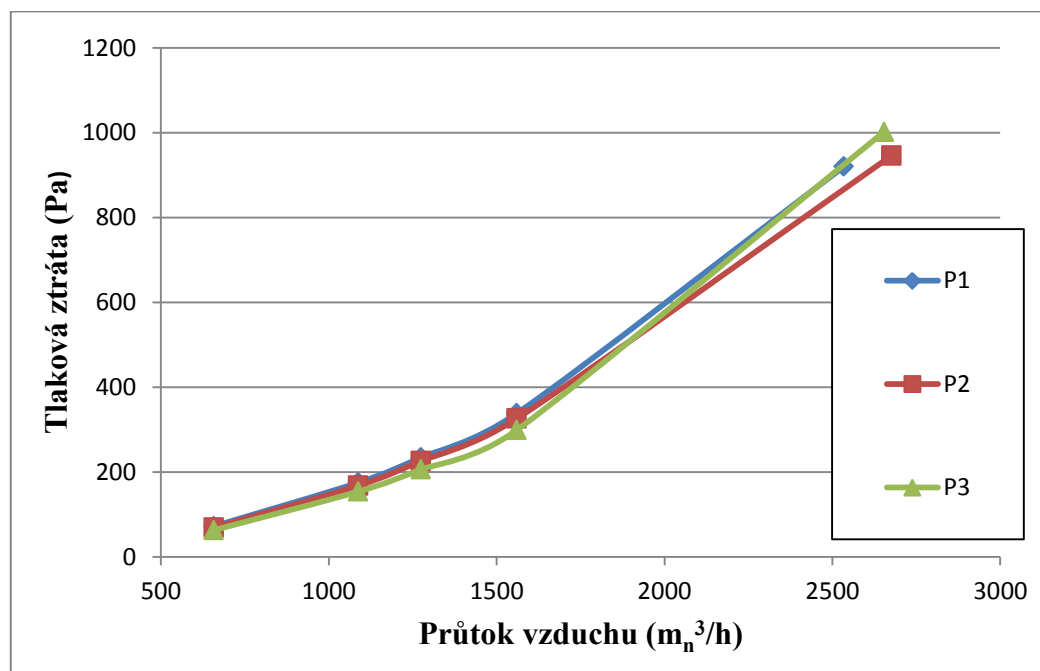
- 1) Zapnutí frekvenčního měniče ventilátoru a počítače s nainstalovaným softwarem pro ovládání ventilátoru, připojení USB výstupu z měřicích zařízení do PC
- 2) Zapojení měřicí hadičky do tlakoměru, kalibrace tlakoměru
- 3) Uzavření všech dvířek a nastavení konkrétní polohy pohyblivých řad roštu
- 4) Pomocí PC je ovládán ventilátor a zobrazovány hodnoty – odečtení hodnot - tlakové difference a průtoku pro nastavené hodinové průtoky
- 5) Nastavení dalších požadovaných poloh a opakování bodu 4 pro všechny žádané polohy
- 6) Veškerá měření jsou opakována 3x a jako výsledná hodnota je uvažován jejích aritmetický průměr.



Obrázek 6.1: Prázdný rošt v poloze (P1) s červeně vyznačenými koncovými polohami (P3) pohyblivých roštnic [7]

<u>Poloha P1, mezera mezi roštnicemi konstrukční - 4,5 mm</u>					
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2534
Tlaková ztráta (Pa)	72	175	234	338	920
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,76
<u>Poloha P2, mezera mezi roštnicemi konstrukční - 4,5 mm</u>					
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2676
Tlaková ztráta (Pa)	69	168	226	326	946
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,81
<u>Poloha P3, mezera mezi roštnicemi konstrukční - 4,5 mm</u>					
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2654
Tlaková ztráta (Pa)	63	154	206	299	1002
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,80

Tabulka 6.1: Parametry prázdného roštu



Graf 6.1: Závislost tlakové ztráty prázdného roštu na průtoku vzduchu

6.2 Měření prázdného roštu s použitím mezer mezi roštnicemi

Toto měření má za úkol simulovat roztažení mezer mezi roštnicemi vlivem teplotní roztažnosti. Minimální vzdálenost jednotlivých roštnic je 4,5 mm. Tato vzdálenost je dána konstrukčně velikosti zámku roštnice. Do mezer mezi roštnicemi jsou vkládány přesně vyrobené distanční plechy - Obrázek 6.2, které zvětší vzájemnou vzdálenost mezi roštnicemi na požadovanou. V prvním měření budou užity distanční plechy tloušťky 2 a 3 mm pro vymezení celkové mezery 5 mm. V druhém měření budou

použity distanční plechy tloušťky 2 a 4 mm pro vymezení celkové mezery 6 mm mezi roštnicemi.

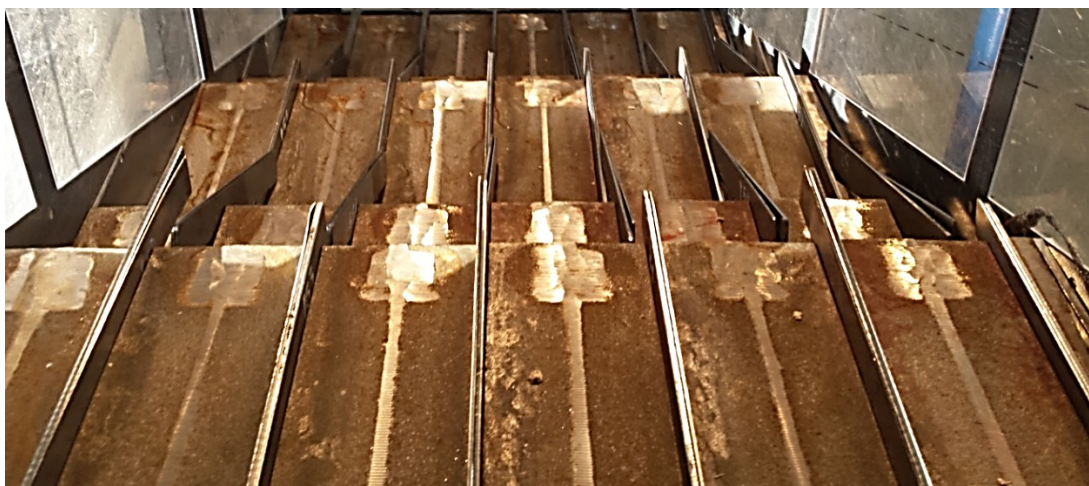


Obrázek 6.2: Distanční plechy o tloušťce 1mm - P50, 2mm - P51, 3mm - P52, 4mm - P53 [7]

Postup měření:

Během tohoto měření je užíván postup jako u měření samostatného roštu navíc, s dalšími body:

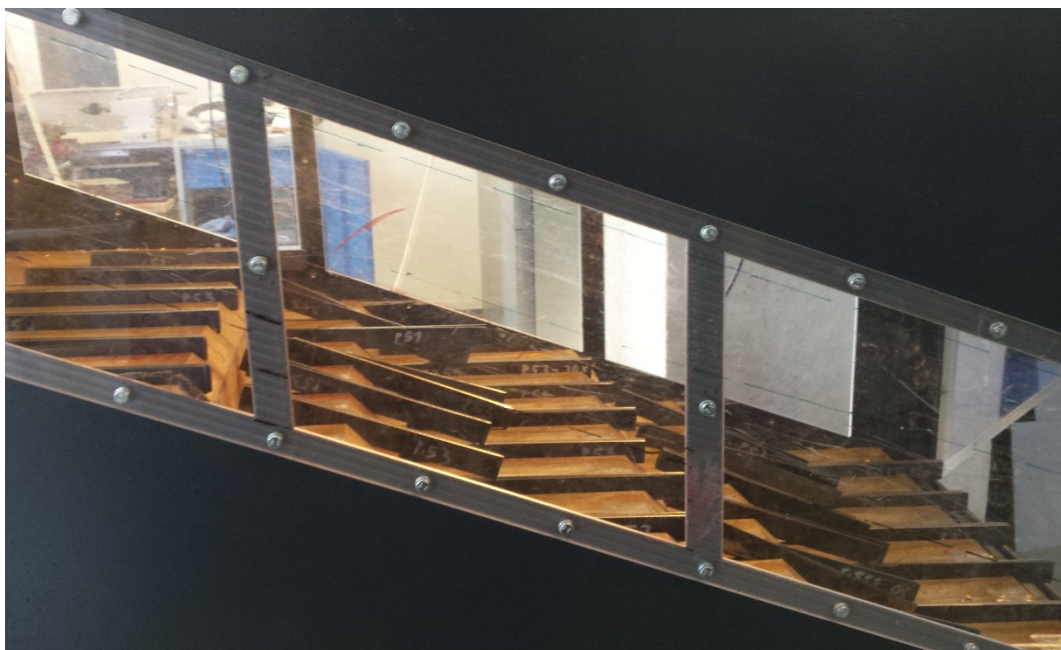
- 1) Aby bylo možné mezi roštnice vložit distanční plechy - Obrázek 6.2, je nutné vytáhnou distanční roštnice (nacházejí se se mezi boční roštnicí a stěnou zařízení) o šířce odpovídající celkovému roztažení jedné řady
- 2) Mezi všechny roštnice v každé řadě jsou vloženy distanční plechy seskupeny tak, aby bylo dosaženo požadované mezery mezi roštnicemi - Obrázek 6.3



Obrázek 6.3: Detail roštové plochy s vloženými distančními plechy mezi roštnicemi [7]

- 3) Všechny distanční plechy jsou vytaženy a následuje proměření roštu – viz bod 4 předchozí kapitoly
 - 4) Opět jsou do mezer vloženy stejné distanční plechy a rošt je posunut do další pozice
 - 5) Po úpravě distančních plechů, který během posunu roštnic vypadly, následuje opět měření dle bodu č. 4 předchozí kapitoly
- body č. 4 a 5 opakujeme pro všechny žádané pozice vždy pro žádané seskupení distančních plechu mezi roštnicemi a distančních roštnic mezi stěnou a poslední boční roštnicí

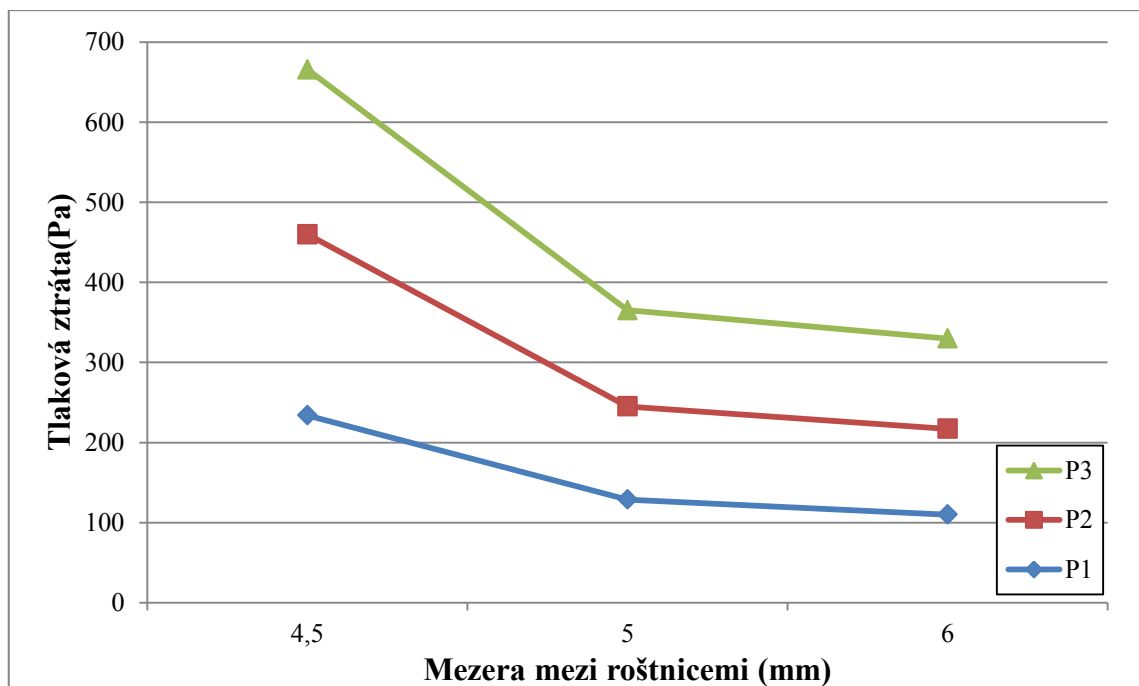
Tabulka 6.2 a Graf 6.2 znázorňují výsledky měření - při zvětšování mezer mezi roštnicemi klesá tlaková ztráta a to ve všech polohách roštu.



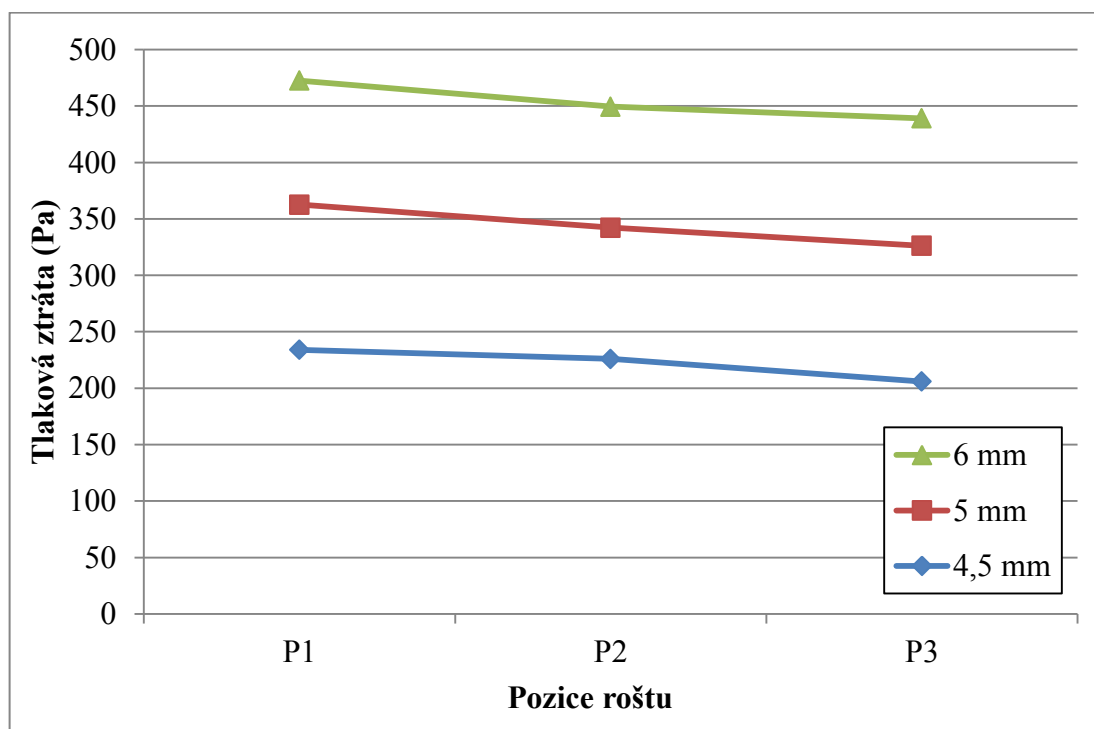
Obrázek 6.4: Roštová plocha s vloženými distančními plechy [7]

	<u>Poloha P1</u>									
	Mezera mezi roštnicemi 5 mm					Mezera mezi roštnicemi 6 mm				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2837	658	1088	1274	1560	2958
Tlaková ztráta (Pa)	39	96	129	187	575	33	82	110	180	509
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,86	0,20	0,33	0,38	0,47	0,89
	<u>Poloha P2</u>									
	Mezera mezi roštnicemi 5 mm					Mezera mezi roštnicemi 6 mm				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2942	658	1088	1274	1560	2963
Tlaková ztráta (Pa)	35	87	116	170	563	32	80	107	157	524
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,89	0,20	0,33	0,38	0,47	0,89
	<u>Poloha P3</u>									
	Mezera mezi roštnicemi 5 mm					Mezera mezi roštnicemi 6 mm				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2843	658	1088	1274	1560	3002
Tlaková ztráta (Pa)	37	90	120	175	538	34	84	113	164	548
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,86	0,20	0,33	0,38	0,47	0,90

Tabulka 6.2: Parametry prázdného roštu s rozdílnou mezerou mezi roštnicemi



Graf 6.2: Vliv mezery mezi roštnicemi na tlakovou ztrátu v jednotlivých polohách pro průtok $1274 \text{ m}^3/\text{h}$



Graf 6.3: Vliv pozice roštu na tlakovou ztrátu pro různé mezery mezi roštnicemi

6.3 Metodika měření paliva

Pevná biopaliva, která jsou využívána na kotlích společnosti Vyncke, jsou většinou odpadním produktem, jehož využitím zlepšíme ekonomiku a ekologii celého procesu. Ve své diplomové práci se budu zabývat následujícími palivy: dřevní štěpka, pelety ze slunečnicových slupek, kukuřičné klasy, olivové slupky a pecky, kávová sedlina a dřevní pelety. Tato paliva budou v testovacím zařízení proměřena ve vrstvách o tloušťce 10, 20 a 30 cm. Výšky vrstvy byly již předem známy a jsou na ně dimenzovány průzory pro pozorování paliva.

6.3.1 Stanovení metodiky měření paliva

Pro určení metodiky měření tlakové ztráty roštu s palivem bylo provedeno měření, zabývající se vlivem užívání hradítka během posunu roštu. Toto měření se skládalo z 8 možných scénářů, které byly 5x opakovány a výsledky vyhodnoceny - Tabulka 6.3. Do testovacího standu bylo vloženo 10 cm dřevních pelet.

Popis jednotlivých situací

1. Na rošt je nasypáno palivo (10 cm dřevních pelet), nastavena první pozice a palivo zarovnáno pomocí hradítka – Obrázek 6.5



Obrázek 6.5: Zarovnaná 10 cm vrstva pelet, rošt v pozici P1 [7]

2. Rošt je přesunut z pozice P1 do pozice P2. Vlivem pohybu roštu se na vrstvě paliva objevuje zvlnění – Obrázek 6.6



Obrázek 6.6: Rošt v pozici P2, bez zarovnání paliva po přesunu roštu z pozice P1 [7]

3. Rošt je ponechán v pozici P2, ale pomocí hradítka je vrstva srovnána. Jelikož se vysunutím pohyblivých řad zmenšil prostor pro palivo, je linie zarovnání nepatrně výše než v původní pozici a přebytečné palivo je odebráno
4. Rošt je přesunut z P2 do pozice P3, objevuje se větší zvlnění



Obrázek 6.7: Rošt v pozici P3, bez zarovnání paliva po přesunu z pozice P2 [7]

5. Rošt je v pozici P3, vrstva paliva je zarovnána, opět dochází k úbytku prostoru pro palivo díky posunu roštnic a tak je přebytečné palivo, přesahující zarovnanou vrstvu 10 cm, odebráno.

Poznámka: Jelikož při těchto pěti měřeních dochází k přerušení kontinuity pohybu materiálu pomocí zarovnávání a dále je během přesunu roštu odebíráno palivo, byly provedeny další tři měření, které měly tuto situaci napravit.

6. Rošt je po nastavení pozice P1 a srovnání paliva hradítkem na 10 cm vysokou vrstvu přesunut přímo do pozice P3, bez upravování hradítkem v této pozici.

7. Rošt zůstává v pozici P3, palivo na roštu je zarovnáno pomocí hradítka. Díky vysunutí roštnic a zmenšení prostoru pro palivo je výška zarovnané vrstvy nepatrně vyšší než původní 10 cm vrstva v pozici P1

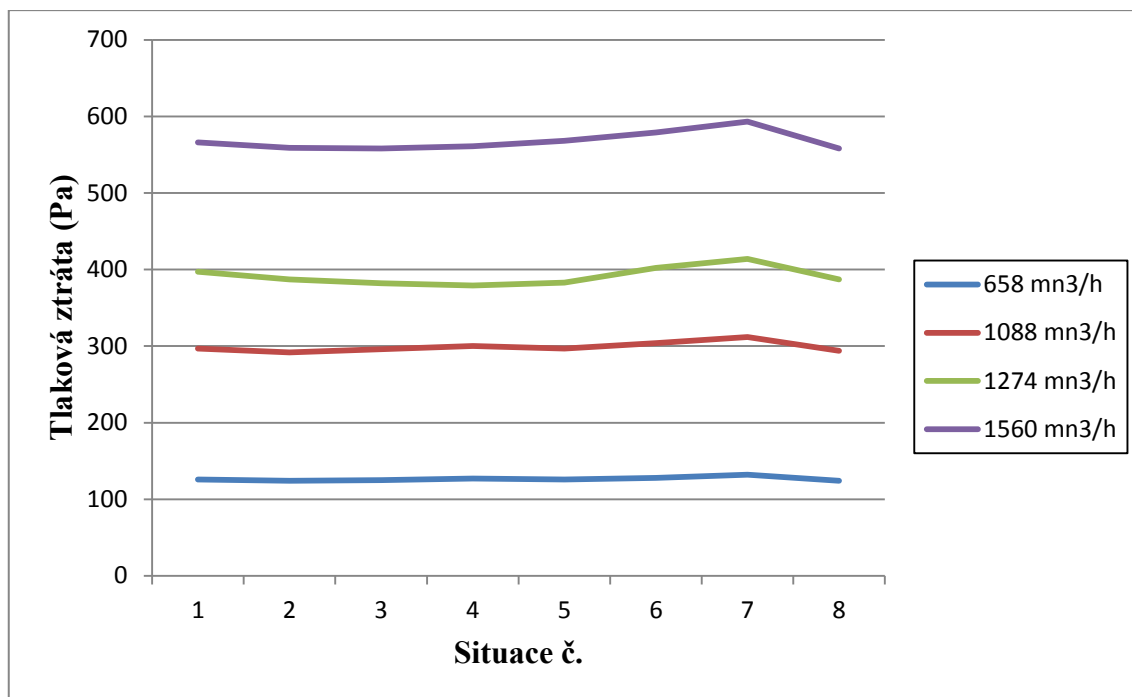
8. Rošt je po nastavení pozice P1 a srovnání paliva hradítkem na 10 cm vysokou vrstvu a přesunut do pozice P2. Díky vysunutí roštnic a zmenšení prostoru pro palivo je výška zarovnané vrstvy nepatrně vyšší než původní 10 cm vrstva v pozici P1.

Závěr: Těchto 8 situací bylo 5 krát proměřeno a průměrné výsledky zapsány - Tabulka 6.3. Z této tabulky a postupu při měření byly po diskuzi vybrány situace číslo 1., 2. a situace č. 4. bez srovnání vrstvy v bodě č. 2. Tyto situace budou proměřovány u všech paliv a pro všechny vrstvy. Z tabulky je také zřejmé, že zarovnávání paliva má oproti původnímu předpokladu minimální vliv. Posun roštu a následný vznik vln - Obrázek 6.6 a Obrázek 6.7 se projevuje tím, že v určitých místech roštu je vrstva paliva nižší a v jiných místech roštu je vrstva paliva vyšší. Tyto rozdíly výšky vrstvy paliva na roštu nemají na tlakovou ztrátu významný vliv. Hradítko je tedy užíváno jen na začátku měření pro stanovení stejných vstupních podmínek pro všechna měření a paliva.

Situace číslo	Pozice	Zarovnání vrstvy	Průměrná tlaková ztráta – roštu + paliva po 5 měřeních (Pa)			
			658 m_n^3/h	1088 m_n^3/h	1274 m_n^3/h	1560 m_n^3/h
1.	1	Ano	126	297	397	566
2.	1→2	Ne	124	292	387	559
3.	1→2	Ano	125	296	382	558
4.	2→3	Ne	127	300	379	561
5.	2→3	Ano	126	297	383	568
6.	1→3	Ne	128	304	402	579
7.	1→3	Ano, CM*	132	312	414	593
8.	1→2	Ano, CM*	124	294	387	558

Tabulka 6.3: Stanovení metodiky měření

*CM=CONSTANT MASS – měření probíhá za stálého množství paliva – bez odebírání paliva při posunu roštnic



Graf 6.4: Tlaková ztráta v jednotlivých situacích

6.3.2 Výsledná metodika měření paliva

- Na rošt zařízení v poloze P1 je vkládáno měřené palivo v rovnoměrné vrstvě po celé ploše
- Množství paliva – vrstva paliva je určována nastavením hradítka do požadované výšky – 10, 20 nebo 30 cm
- Palivo je dávkováno tak aby byl konec hradítka po celou dobu s kontaktem vrstvy v celé délce šířce roštu po celé délce zařízení – tím je zaručeno rovnoměrné rozložení vrstvy a stejné množství paliva pro všechny měření paliva
- Po proměření v poloze P1 je rošt přesunut do pozice P2 a bez jakýchkoliv úprav paliva je provedeno měření
- V následující poloze P3 je provedeno měření a rovněž nedochází k úpravě vrstvy
- Veškerá měření s palivy jsou opakována třikrát a je uvažován jejich aritmetický průměr

6.4 Tlaková ztráta paliva – měření, výpočet a vyhodnocení

6.4.1 Tlaková ztráta dle Ergunovy rovnice

Tato rovnice, určená pro výpočet tlakové ztráty vrstvy částic, pracuje s tvarovými koeficienty, které je velmi obtížné stanovit vzhledem k rozdílnosti zrn paliva jediného druhu a nasákavosti materiálu. Proto jsem si pro výpočet zvolil dřevní pelety, jejichž vlastnosti dosahují nejmenších tvarových odchylek.

$$\Delta p = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot L \cdot U}{\varepsilon^3 \cdot (\phi \cdot d_k)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_g U^2}{\varepsilon^3 \cdot \phi \cdot d_k} \quad (2)$$

Kde je Δp	tlaková ztráta vrstvy [Pa]
ε	mezerovitost částic obsažených ve vrstvě [1]
ϕ	sféricita (=kulatost) částic [1]
L	výška vrstvy částic [m]
μ	dynamická viskozita plynu [kg/m·s]
U	rychlost proudění plynu [m/s]
ρ_g	hustota plynu [kg/m ³]
d_k	velikost částice [m]

6.4.2 Měřená paliva

Do měření bylo zahrnuto 6 pevných biopaliv, která pocházejí od provozovatelů kotlů Vyncke. Paliva byla dovezena na paletách ve velkoobjemových vacích nebo krabicích. U každého paliva byl proveden palivový rozbor. Výsledky zobrazuje Tabulka 6.4.

	Palivo	Dřevní pelety	Dřevní štěpka	Slunečnicové pelety	Výlisky z oliv	Kávová sedlina	Kukuřičné klasy
Parametr	Značka [jednotka]						
Celková vlhkost	W^r [%]	7,38	39,33	10,91	12,49	55,4	9,73
Popelovina surový stav	A^r [%]	0,94	0,25	3,21	4,42	0,24	2,09
Popelovina suchý stav	A^d [%]	1,02	0,42	3,6	5,05	0,54	2,31
Spalné teplo	Q_n^d [kJ/kg]	20 270	20 300	20 640	20 970	25 670	18 860
Výhřevnost	Q_i^r [kJ/kg]	17 380	10 540	16 970	16 890	9 360	15 640
Uhlík	C^d [%]	51,09	50,84	51,01	51,04	57,75	47,8
Vodík	H^d [%]	6,05	6,16	5,96	6,06	7,64	5,81
Dusík	N^d [%]	0,14	0,16	0,98	1,24	1,89	0,55
Síra	S^d [%]	<0,02	<0,02	0,18	0,11	0,14	0,05
Chlór	Cl^d [%]	0,04	0,04	0,12	0,19	0,05	0,12
Fluór	F^d [%]	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Sypná hmotnost	ρ_s [kg/m ³]	630	190	510	500	520	150
Porozita (dle UTB)	ϵ [%]	56,7	85,9	62,1	64,0	59,5	79,1
Porozita (dle TÜV NORD)	ϵ [%]	56,7	88,9	-	60,4	51,9	89,7

Tabulka 6.4: Parametry testovaných paliv [6], [13]

6.4.3 Dřevní pelety - výpočet a měření tlakové ztráty

Jedná se o slisované granule válcovitého tvaru. Dřevěné pelety se vyrábějí z vedlejších produktů dřevozpracujícího průmyslu, lesních a zemědělských zbytků. Výhřevnost pelet se pohybuje kolem 18 MJ/kg a jsou tak výhřevnějším palivem, než některé druhy uhlí. Jejich výhodou je vyšší hustota energie a nižší nároky na uskladnění a dopravu. Značnou nevýhodou jsou vyšší náklady na vstupní energie, nutné pro výrobu pelet. Výrobní proces tvoří sušení, drcení, peletizace, chlazení a balení. To vše navyšuje cenu výsledného produktu a omezuje využití v průmyslových topeništích větších výkonů. Pelety jsou pro domácnosti dodávány v pytlích o přibližné hmotnosti 15 kg, ve velkých textilních pytlích o hmotnosti 1 t nebo moderním způsobem, kdy nákladní automobil s cisternou pneumatickou dodávkou flexi hadicemi dopraví pelety přímo do kotelny či skládky paliva.

Výchozí surovina: čisté suché hoblovačky z měkkého dřeva

Jedná se o granule průměru 6 mm, délky cca 10 – 20 mm, charakteristické polosvětlou barvou smrkového dřeva.



Obrázek 6.8: Dřevní pelety [7]

- Dřevěná peleta**
- válcový tvar
 - průměr pelety d_p 6 mm
 - průměrná délka pelety h_p 15 mm

Objem pelety

$$\begin{aligned}
 V_p &= \pi \cdot r^2 \cdot h_p \\
 V_p &= \pi \cdot 3^2 \cdot 15 \\
 V_p &= 424,1 [\text{mm}^3]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Obsah pelety

$$\begin{aligned}
 S_p &= 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + h_p) \\
 S_p &= 2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot (3 + 15) \\
 S_p &= 339,3 [\text{mm}^2]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Průměr koule se stejným objemem jako peleta

$$\begin{aligned}
 V_k &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \\
 r_k &= \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_p}{4 \cdot \pi}} \\
 r_k &= \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 424,1}{4 \cdot \pi}} \\
 r_k &= 4,66 [\text{mm}]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Povrch koule se stejným objemem jako peleta

$$\begin{aligned}
 S_k &= 4 \cdot \pi \cdot r_k^2 \\
 S_k &= 4 \cdot \pi \cdot 4,66 \\
 S_k &= 273,0 [\text{mm}^2]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Kulovitost částice

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{S_k}{S_p} \\
 \phi &= \frac{273,0}{339,3} \\
 \phi &= 0,805 [1]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Rychlost proudění plynu

- jelikož nelze přesně změřit rychlost proudění ve vrstvě, vychází výpočet rychlosti z měřeného průtoku vrstvou a známého obsahu průřezu měřicího zařízení
- výpočet je proveden pro hodnotu nejbližší hodnotě reálné na kotlích, tedy 1 274 m³/h
- průřez měřicího zařízení $S = 0,922 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned}U &= \frac{\dot{Q}}{3600 \cdot S} \\U &= \frac{1274}{3600 \cdot 0,922} \\U &= 0,384 \text{ [m/s]}\end{aligned}\tag{8}$$

Porozita – parametr, obtížně stanovitelný v laboratoři

Dosažením do Ergunovy rovnice (2) získáme pro vrstvu o výšce L následující tlakovou ztrátu

Pro $L = 0,1 \text{ m}$

$$\Delta p_{0,1} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot L \cdot U}{\varepsilon^3 \cdot (\phi \cdot d_k)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_g U^2}{\varepsilon^3 \cdot \phi \cdot d_k}\tag{9}$$

$$\Delta p_{0,1} = 150 \cdot \frac{(1 - 0,3)^2 \cdot 0,00002 \cdot 0,1 \cdot 0,384}{0,3^3 \cdot (0,805 \cdot 0,009322)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - 0,3) \cdot 1,2 \cdot 0,384^2}{0,3^3 \cdot 0,805 \cdot 0,009322}$$

$$\Delta p_{0,1} = 144,1 \text{ [Pa]}$$

Pro $L = 0,2 \text{ m}$

$$\Delta p_{0,2} = 150 \cdot \frac{(1 - 0,3)^2 \cdot 0,00002 \cdot 0,2 \cdot 0,384}{0,3^3 \cdot (0,805 \cdot 0,009322)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - 0,3) \cdot 1,2 \cdot 0,384^2}{0,3^3 \cdot 0,805 \cdot 0,009322}$$

$$\Delta p_{0,2} = 288,2 \text{ [Pa]}$$

Pro $L = 0,3 \text{ m}$

$$\Delta p_{0,3} = 150 \cdot \frac{(1 - 0,3)^2 \cdot 0,00002 \cdot 0,3 \cdot 0,384}{0,3^3 \cdot (0,805 \cdot 0,009322)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - 0,3) \cdot 1,2 \cdot 0,384^2}{0,3^3 \cdot 0,805 \cdot 0,009322}$$

$$\Delta p_{0,3} = 432,3 \text{ [Pa]}$$

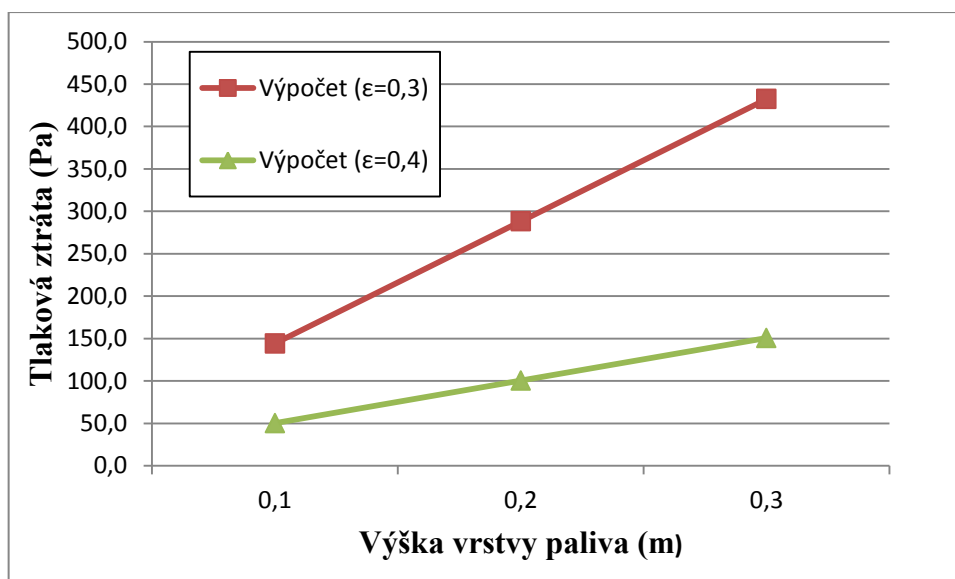
Identický výpočet provedený pro porozitu $\varepsilon = 0,4$ vychází následovně:

$$\Delta p_{0,1} = 50,2 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{0,2} = 100,4 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{0,3} = 150,6 \text{ [Pa]}$$

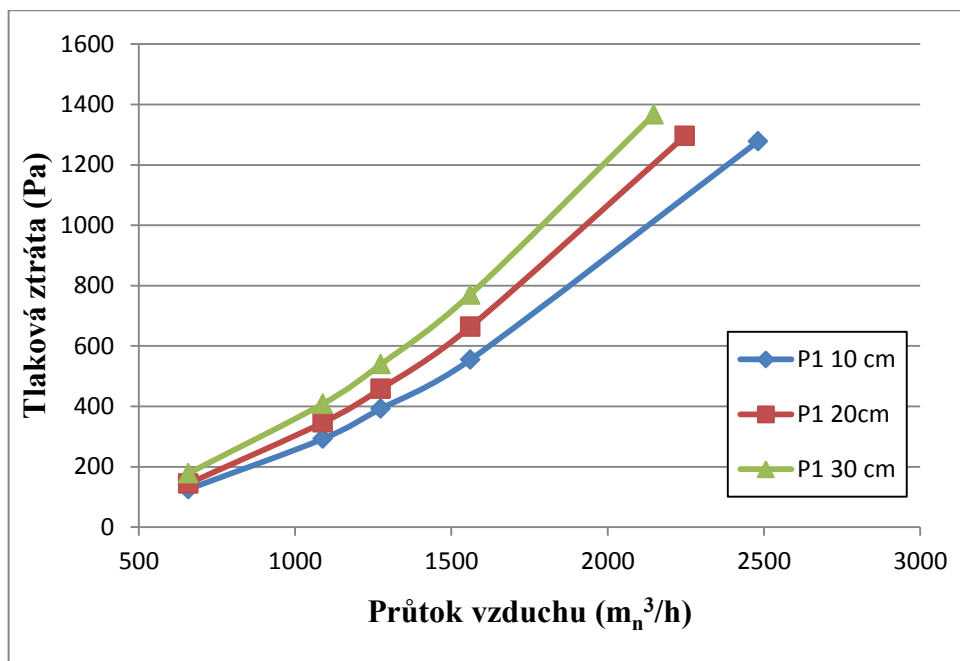
Jak ukazuje Graf 6.5, je vliv porozity na výpočet tlakové ztráty opravdu značný - což je velký nedostatek veškerých výpočtů tlakové ztráty vrstvy.



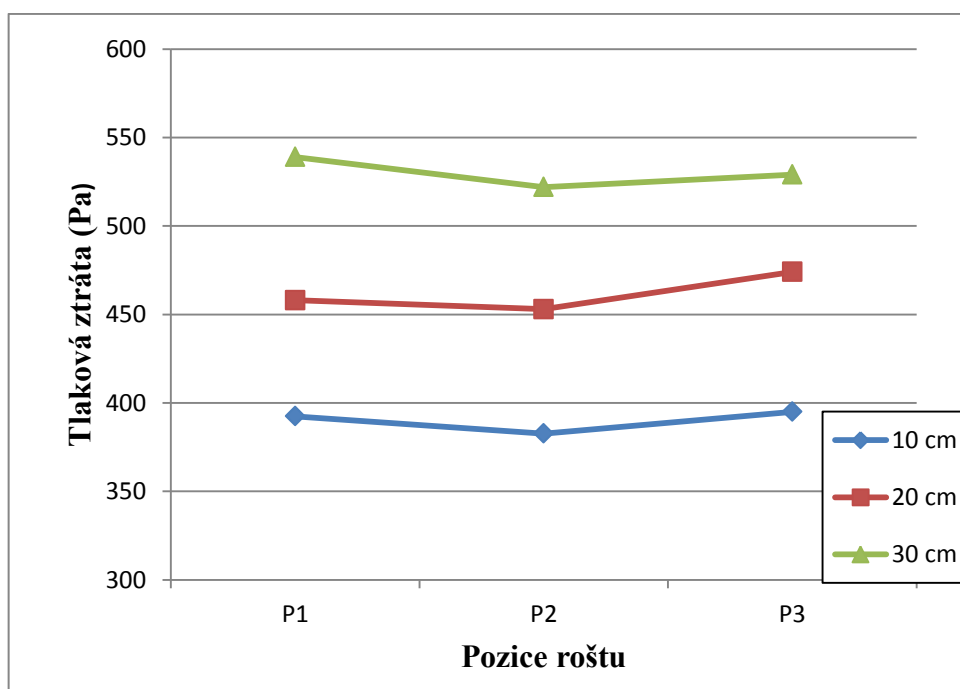
Graf 6.5: Vypočtená tlaková ztráta pro porozitu materiálu $\varepsilon = 0,3$ a $\varepsilon = 0,4$

Naměřené hodnoty

Při měření dřevních pelet docházelo během pohybu roštnic k vytváření vln - Obrázek 6.5, Obrázek 6.6 a Obrázek 6.7. Na některých místech byla tak vrstva pelet po posuvu větší, jinde menší. Tlaková ztráta se během posunu roštnic měnila jen nepatrně u všech vrstev.



Graf 6.6: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1



Graf 6.7: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 m_n^3/h$

	Pozice roštu P1														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2481	658	1088	1274	1560	2247	658	1088	1274	1560	2147
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	125	292	392	554	1278	144	346	458	663	1295	178	408	539	770	1366
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75	0,20	0,33	0,38	0,47	0,68	0,20	0,33	0,38	0,47	0,65
	Pozice roštu P2														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2492	658	1088	1274	1560	2370	658	1088	1274	1560	2260
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	123	287	383	547	1268	143	341	453	653	1408	171	396	522	746	1451
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75	0,20	0,33	0,38	0,47	0,71	0,20	0,33	0,38	0,47	0,68
	Pozice roštu P3														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2489	658	1088	1274	1560	2342	658	1088	1274	1560	2257
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	125	294	395	560	1283	149	357	474	684	1440	175	402	529	756	1473
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75	0,20	0,33	0,38	0,47	0,71	0,20	0,33	0,38	0,47	0,68

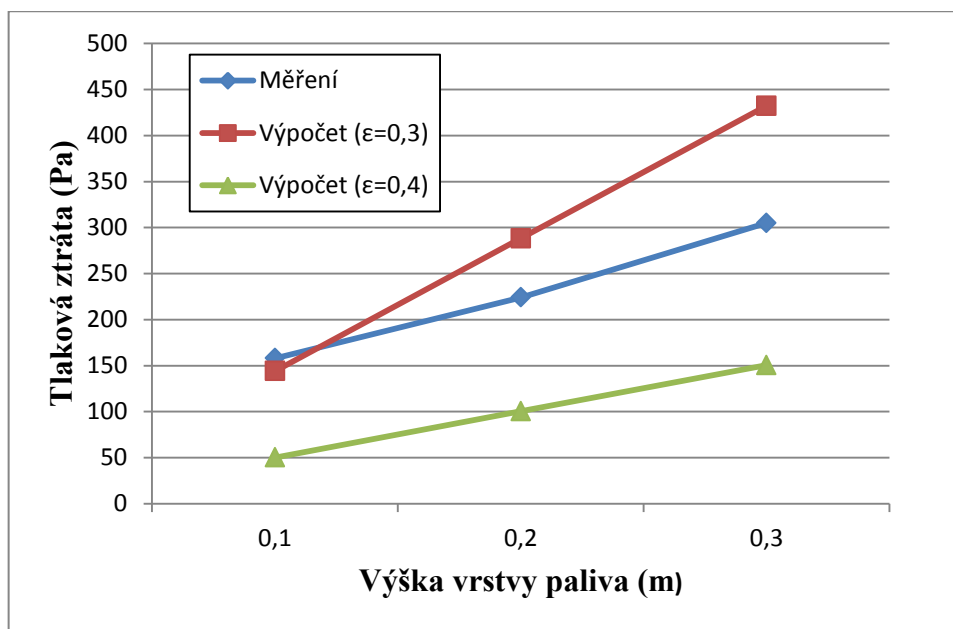
Tabulka 6.5: Parametry pro dřevní pelety

6.4.4 Srovnání měřených a vypočtených hodnot

Porovnání výsledků spočtených s naměřenou realitou - Graf 6.8, je vzhledem k obtížně určitelným vstupním parametrům rovnice nemožné. Parametry nutné pro numerický výpočet tlakové ztráty jako porozita materiálu a sféricita částic nelze u nasákavého materiálu - biomasy přesně stanovit ani v certifikovaných laboratořích jako je TÜV. Proto se ve své práci budu dále zabývat stanovením charakteristik dle naměřených hodnot. Při výpočtu tlakové ztráty dle Ergunovy rovnice dochází při zdvojnásobení výšky paliva taky k zdvojnásobení tlakové ztráty. Tato situace v praxi nenastává. Největší vliv na tlakovou ztrátu měl první vklad paliva – tedy 10 cm, další měření s přidáváním paliva na 20 a 30 cm již tlakovou ztrátu ovlivnily menší měrou než prvních 10 cm paliva.

Vrstva paliva	(m)	0,1	0,2	0,3
Měřeno	(Pa)	158	224	305
Výpočet ($\epsilon=0,3$)	(Pa)	144	288	432
Výpočet ($\epsilon=0,4$)	(Pa)	50	100	151

Tabulka 6.6: Srovnání naměřené a spočtené tlakové ztráty porozitu $\epsilon=0,3$ a $\epsilon=0,4$



Graf 6.8: Srovnání naměřené a spočtené tlakové ztráty porozitu $\epsilon = 0,3$ a $\epsilon = 0,4$

6.4.5 Měření - Dřevní štěpka

Dřevní štěpka je strojně zkrácená a nadrcená dřevní hmota na částice o délce 3 - 250 mm. Lze ji získat jako odpad z lesní těžby či dřevozpracovatelského průmyslu, dále pak z rychle rostoucích dřevin.



Obrázek 6.9: Dřevní štěpka [7]



Obrázek 6.10: Vrstva 10 cm dřevní štěpky na roštu v poloze P2 [7]

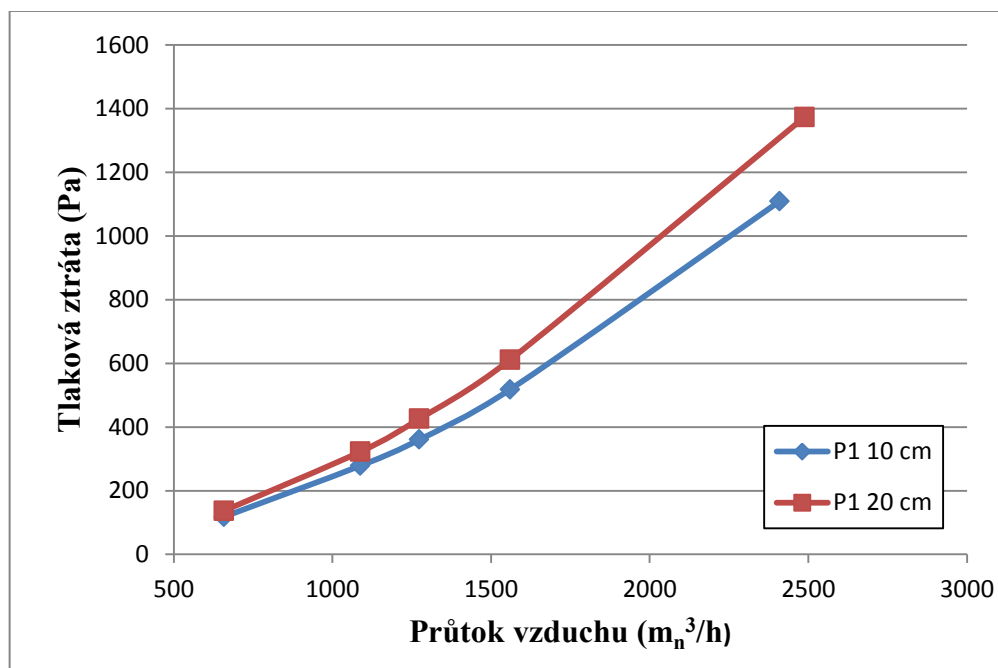
U měření dřevní štěrky docházelo k tomu, že se jednotlivé části dřeva do sebe zasekly a nebylo možné s roštem pohybovat. Proto je v případě dřevní štěrky provedeno kompletní měření jen pro vrstvu 10 cm. U vrstvy 20 cm bylo možné dosáhnout rošt posunout do druhé pozice roštu, ale třetí polohy již nebylo možné dosáhnout. Nejvyšší 30 cm vrstva nebyla z těchto důvodů vůbec měřena.

Při posunu roštových řad docházelo k rozrušení vrstvy a vzniku mezer - Obrázek 6.11. Těmito mezerami volně proudil vzduch a způsoboval v poloze roštu P2 značný pokles tlakové ztráty - Graf 6.10. Nedocházelo k vzniku vln a vysunutí materiálu vzhůru - Obrázek 6.10, ale materiál

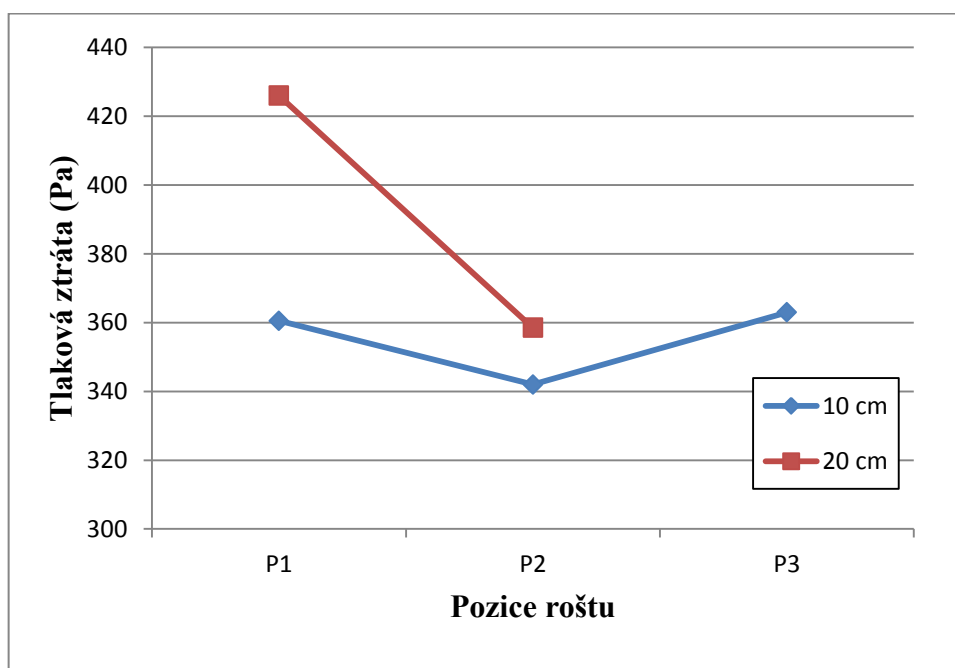


Obrázek 6.11: Mezera vzniklá posuvem roštu [7]

se do sebe při posunu roštu zaklíňoval. Tlaková ztráta samotného roštu v poloze P3 klesá, ale dřevní štěrka se chovala odlišně. Při posunu roštu do pozice P3 došlo k nárůstu tlakové ztráty. Dle mého názoru byl nárůst tlakové ztráty zapříčiněn zmenšením prostoru pro palivo, ke kterému dochází při vysunování roštnic. Důsledkem tohoto docházelo k přechováním paliva, vzájemnému zasekávání třísek a zmenšování volného prostoru mezi jednotlivými kusy, kudy proudil vzduch.



Graf 6.9: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1



Graf 6.10: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 m_n^3/h$

	<u>Pozice roštu P1</u>									
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2410	658	1088	1274	1560	2488
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	118	279	361	518	1110	137	323	426	612	1374
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,73	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75
	<u>Pozice roštu P2</u>									
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2523	658	1088	1274	1560	2494
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	110,5	258	342	498	1186	114	270	359	519	1219
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,76	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75
	<u>Pozice roštu P3</u>									
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>									
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2501					
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	115,5	269	363	522	1237					
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,75					

Tabulka 6.7: Parametry pro dřevní štěpku

6.4.6 Měření - Kukuřičné klasy

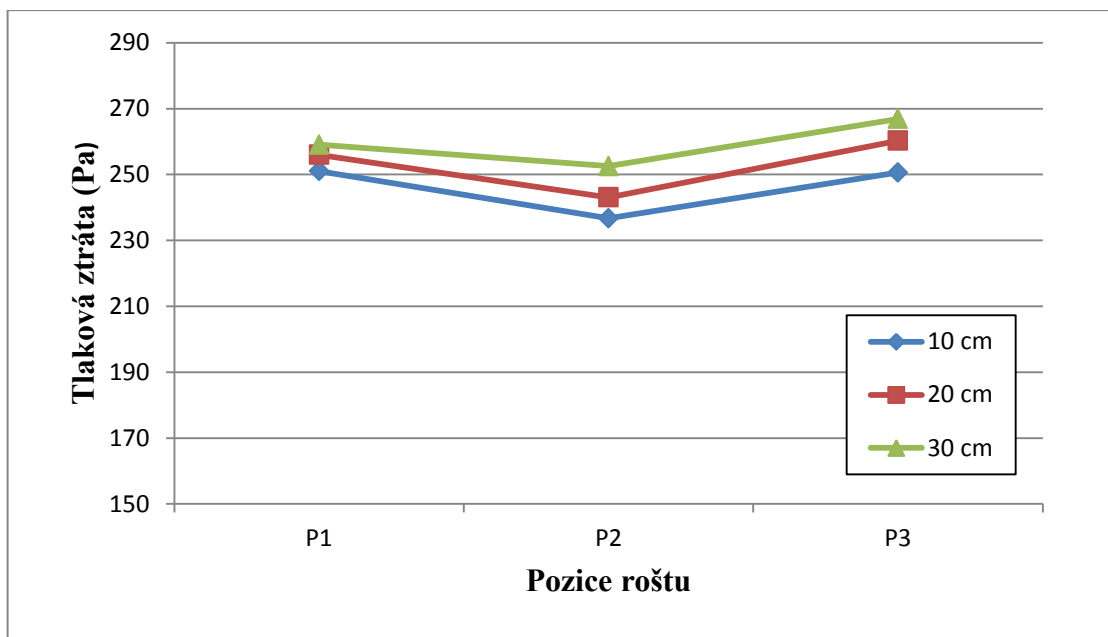


Obrázek 6.12: Kukuřičné klasy [7]

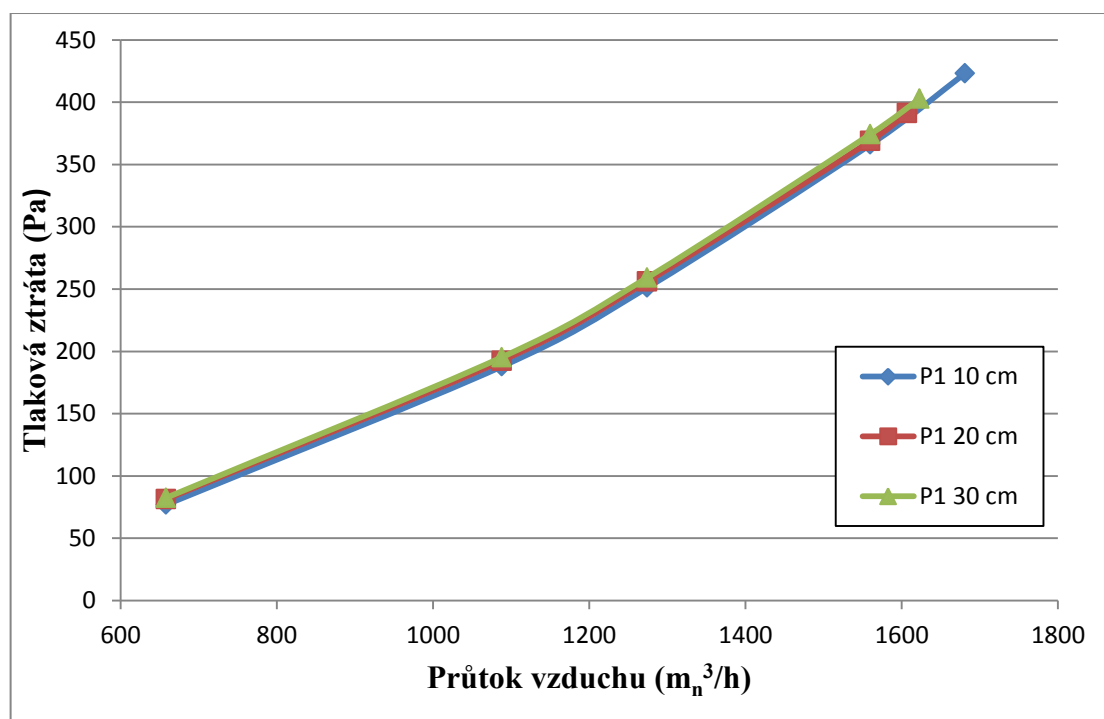
Výška vrstvy kukuřičných klasů měla na tlakovou ztrátu minimální vliv. Výsledky měření pro všechny vrstvy jsou velmi podobné. V poloze P2 docházelo k mírnému poklesu tlakové ztráty, zejména vlivem poklesu tlakové ztráty samotného roštu. Tlaková ztráta samotného roštu v poloze P3 klesá, ale kukuřičné klasy se chovaly odlišně. Jak znázorňuje Obrázek 6.13, nedocházelo k výraznému vzniku vln jako například u pelet. Při posunu roštu do pozice P3 došlo ve všech vrstvách k nárůstu tlakové ztráty. Dle mého názoru byl nárůst tlakové ztráty zapříčiněn zmenšením prostoru pro palivo, ke kterému dochází při vysunování roštnic. Důsledkem tohoto docházelo k pěchování paliva a zmenšování volného prostoru mezi jednotlivými klasy, kudy proudil vzduch.



Obrázek 6.13: Měření 10 cm vrstvy kukuřičných klasů v poloze roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]



Graf 6.11: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$



Graf 6.12: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1

	<u>Pozice roštu P1</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	1681	658	1088	1274	1560	1607	658	1088	1274	1560	1623
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	77	188	251	366	423	81	192	256	369	391	82	195	259	374	403
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,51	0,20	0,33	0,38	0,47	0,48	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49
	<u>Pozice roštu P2</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	1631	658	1088	1274	1560	1653	658	1088	1274	1560	1648
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	72	177	237	344	374	76	183	243	353	393	81	190	253	365	404
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49	0,20	0,33	0,38	0,47	0,50	0,20	0,33	0,38	0,47	0,50
	<u>Pozice roštu P3</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	1613	658	1088	1274	1560	1632	658	1088	1274	1560	1634
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	77	188	251	365	387	82	194	260	377	409	85	201	267	387	423
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49

Tabulka 6.8: Parametry pro kukuřičné klasy

6.4.7 Měření - Výlisky z oliv

Jde o vedlejší produkt při výrobě olivového oleje, který je možno dále energeticky využívat.

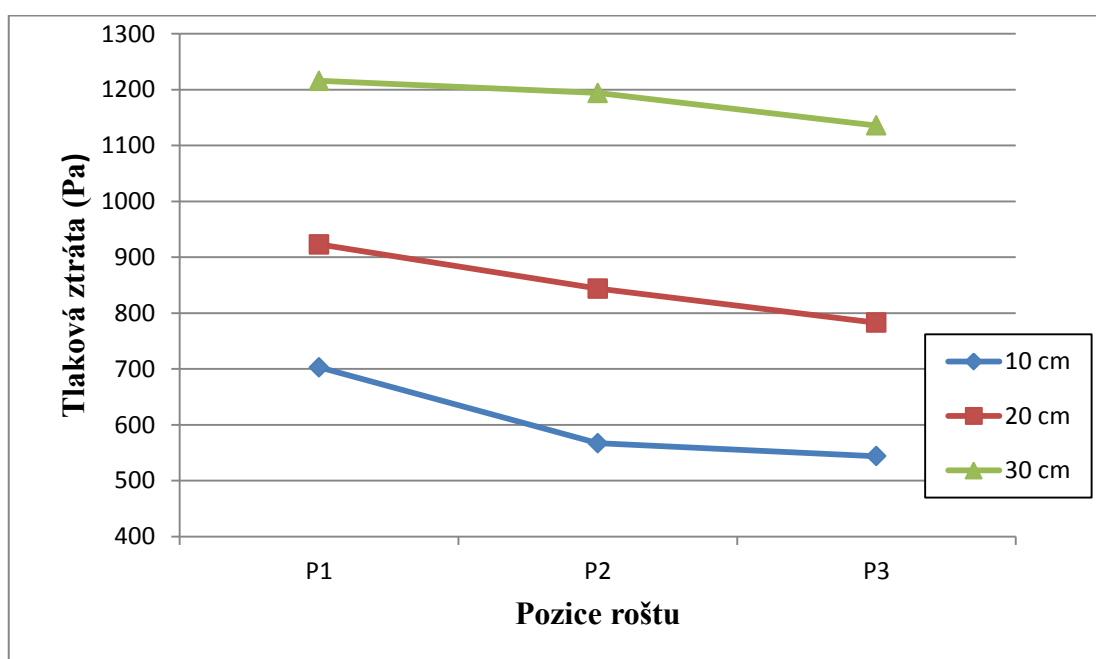


Obrázek 6.14: Výlisky z oliv [7]

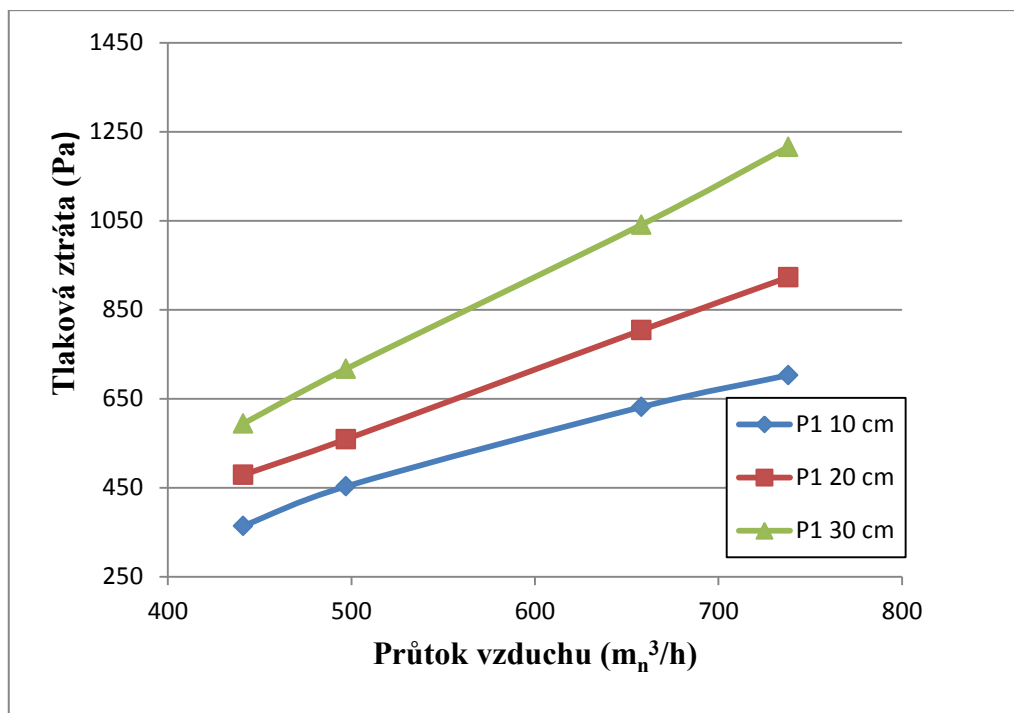
Měření výlisku z oliv bylo limitováno úletem částic a nebylo tak možné dosáhnout vyšších průtoků. Proto bylo měření zahájeno již na nižších průtocích a pokračovalo na možnou hranici, než začalo docházet k zvýšenému úletu paliva. Venturiho trubice je kalibrována na měření od $600 \text{ m}_n^3/\text{h}$, proto musíme naměřené hodnoty pod touto hranicí brát s rezervou, avšak dle chování paliva nad touto hranicí se hodnoty jeví jako správné. Během měření s 10 cm vrstvou paliva docházelo při posuvu roštnic do polohy P2 k vzniku velmi tenké vrstvy paliva, kde bylo možné pozorovat zvýšený pohyb částic. Tato tenká vrstva způsobovala výraznější pokles tlakové ztráty než u vrstvy 20 a 30 cm. U všech vrstev docházelo při posunu do pozice P2 a P3 k poklesu tlakové ztráty. Palivo se tedy chovalo stejně jako samotný rošt.



Obrázek 6.15: Vrstva 20 cm výlisku z oliv v poloze roštu P2 [7]



Graf 6.13: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $738 \text{ m}^3/\text{h}$



Graf 6.14: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1

<u>Pozice roštu P1</u>												
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>				<u>30 cm</u>			
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	658	738	441	497	658	738	441	497	658	738
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	364	453	632	703	479	559	804	923	594	717	1041	1216
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22
<u>Pozice roštu P2</u>												
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>				<u>30 cm</u>			
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	658	738	441	497	658	738	441	497	658	738
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	282	333	488	567	414	488	720	844	583	691	1015	1194
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22
<u>Pozice roštu P3</u>												
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>				<u>30 cm</u>			
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	658	738	441	497	658	738	441	497	658	738
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	270	320	467	544	387	457	676	783	560	656	968	1136
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22	0,13	0,15	0,2	0,22

Tabulka 6.9: Parametry pro výlisky z oliv

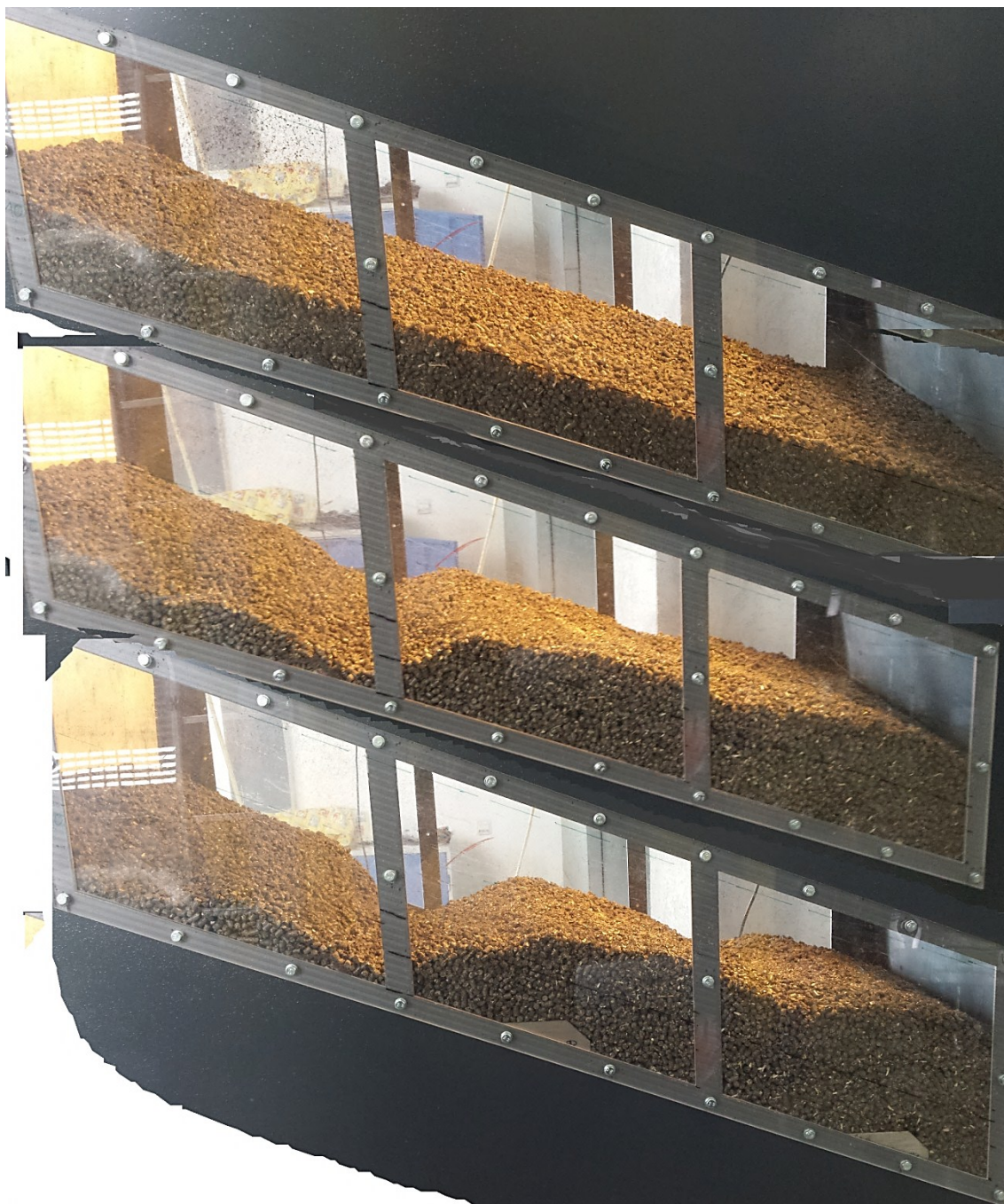
6.4.8 Měření - Pelety ze slunečnicových slupek

Jedná se o pelety ze slunečnicové slupky, vznikající jako odpadní produkt při výrobě produktů ze slunečnicových semen. Tyto slupky jsou v rámci zlepšení vlastností pro spalování upraveny do formy válcových pelet a spalovány v kotlích.

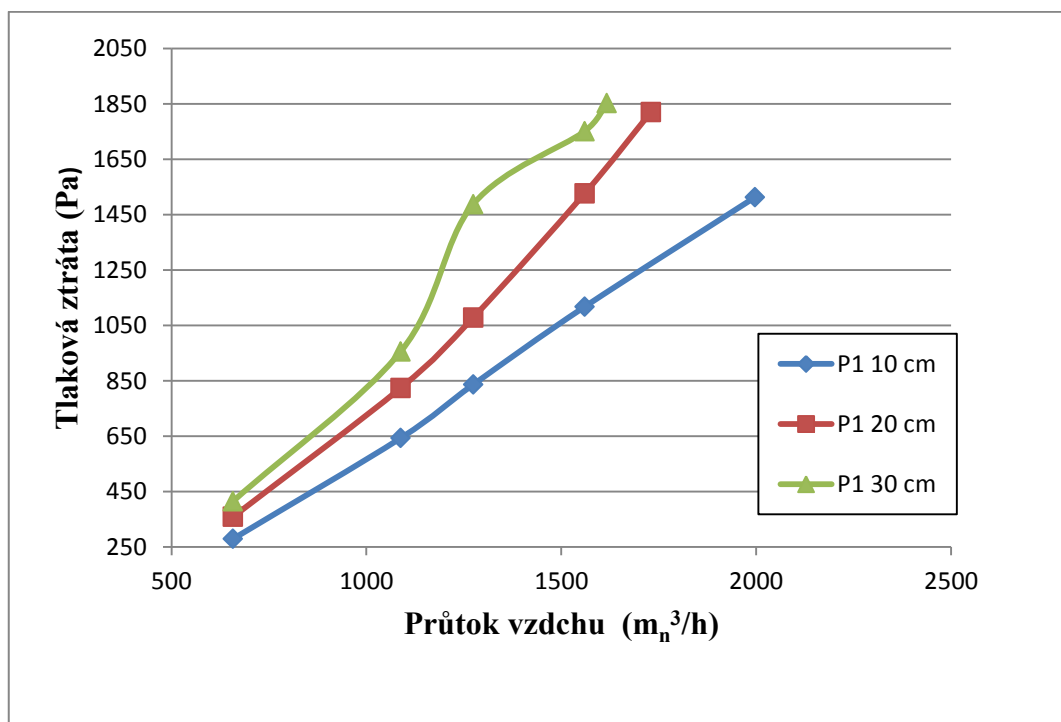


Obrázek 6.16: Pelety ze slunečnicových slupek [7]

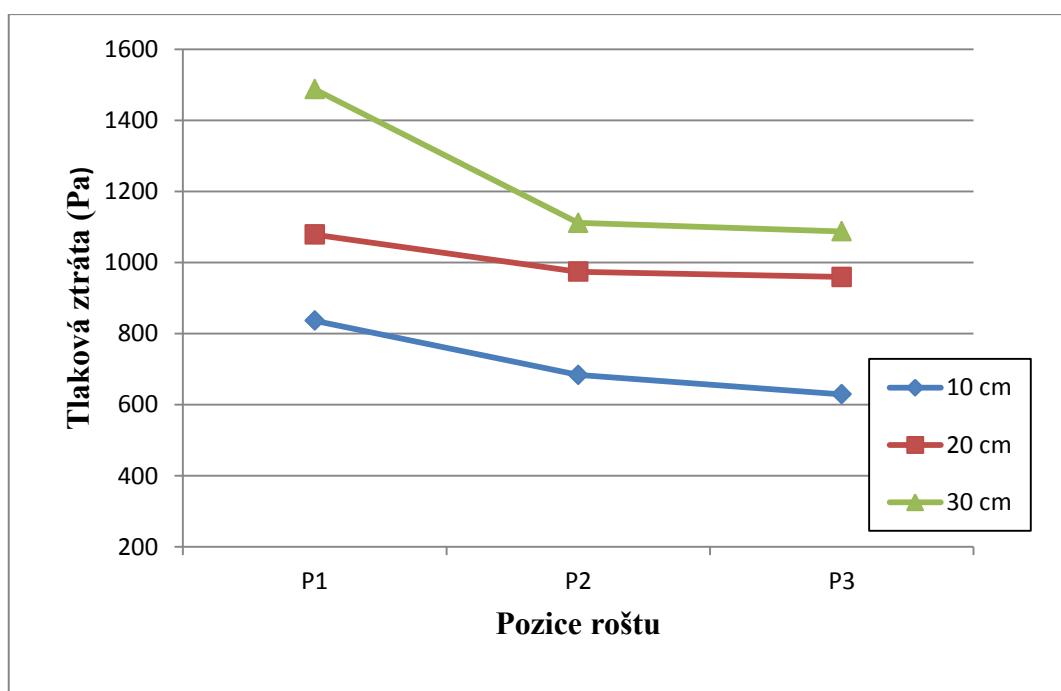
Vrstva slunečnicových pelet se chovala obdobně jako pelety dřevěné. Nedocházelo k úletu částic, tvořily se vlny bez odkrytí roštové plochy.



Obrázek 6.17: Měření 10 cm vrstvy pelet v poloze roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]



Graf 6.15: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1



Graf 6.16: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 m_n^3/h$

	<u>Pozice roštu P1</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	1997	658	1088	1274	1560	1730	658	1088	1274	1560	1617
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	279	643	836	1118	1513	359	824	1078	1527	1821	415	956	1488	1752	1853
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,60	0,20	0,33	0,38	0,47	0,52	0,20	0,33	0,38	0,47	0,49
	<u>Pozice roštu P2</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	2141	658	1088	1274	1560	1828	658	1088	1274	1560	1730
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	225	522	683	960	1573	328	747	974	1383	1804	378	863	1111	1594	1900
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,65	0,20	0,33	0,38	0,47	0,55	0,20	0,33	0,38	0,47	0,52
	<u>Pozice roštu P3</u>														
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>					<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	658	1088	1274	1560	1833	658	1088	1274	1560	1776	658	1088	1274	1560	1727
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	211	496	629	898	1178	316	730	959	1365	1713	362	829	1087	1550	1855
Rychlost nad roštem (m/s)	0,20	0,33	0,38	0,47	0,55	0,20	0,33	0,38	0,47	0,54	0,20	0,33	0,38	0,47	0,52

Tabulka 6.10: Parametry pro pelety ze slunečnicových slupek

6.4.9 Měření - Kávová sedlina

Kávová sedlina je odpadní produkt, vzniklý produkcí kávy, který je dále energeticky využíván.

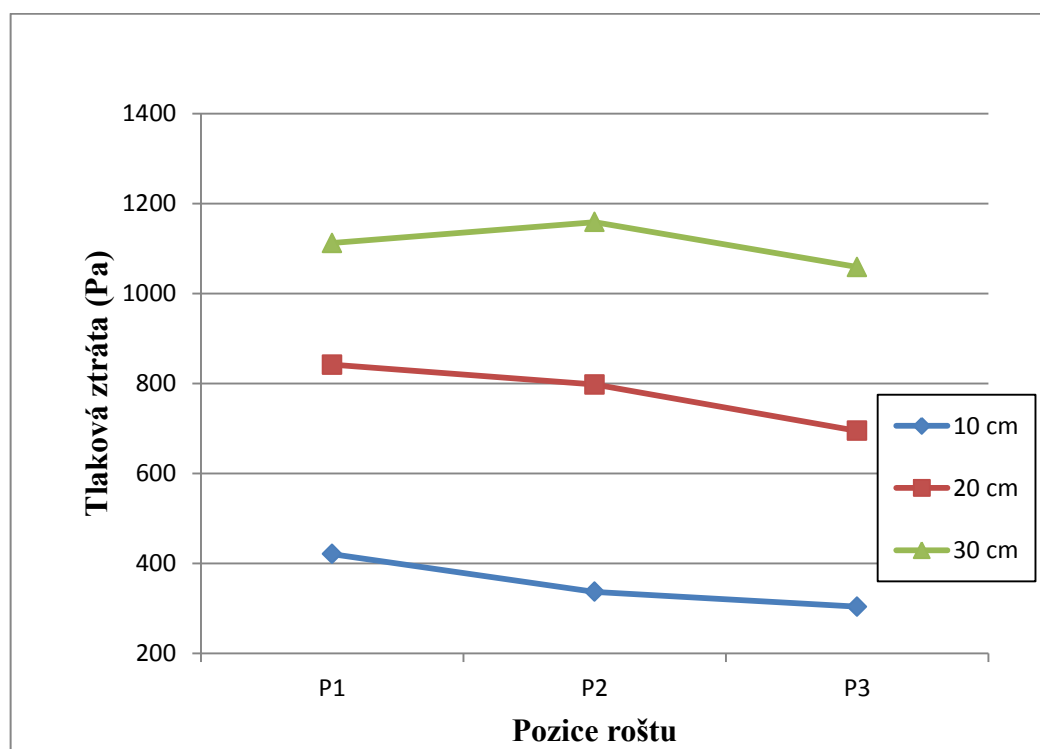


Obrázek 6.18: Kávová sedlina [7]

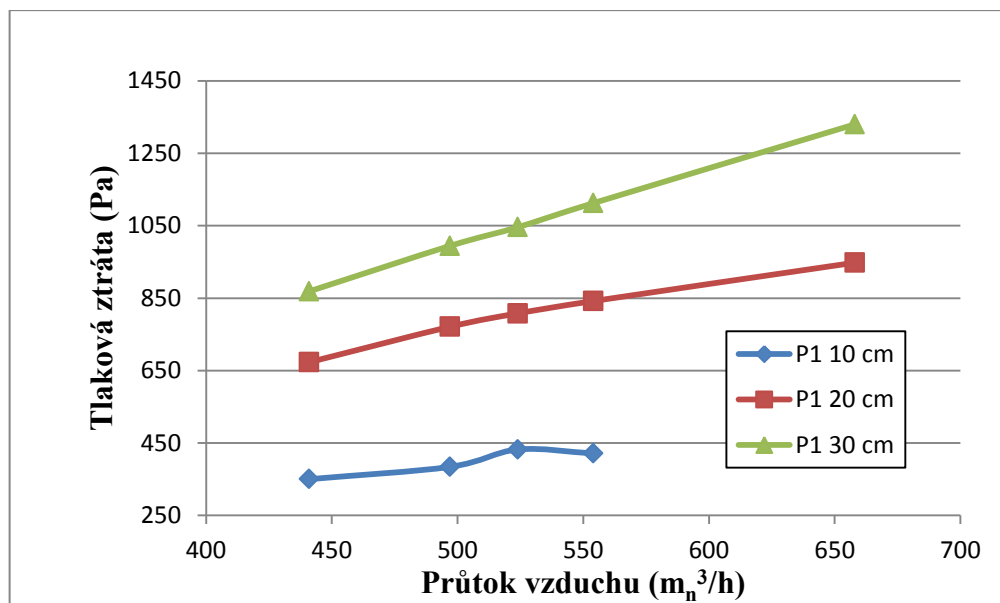
Měření kávy bylo limitováno úletem částic a nebylo tak možné dosáhnout vyšších průtoků. Proto bylo měření zahájeno již na nižších průtocích a pokračovalo na možnou hranici, než začalo docházet k zvýšenému úletu paliva. Zejména u nejnižší 10 cm vrstvy kávy docházelo k pohybu vrstvy již při velmi nízkých průtocích, a proto nejsou u této vrstvy proměřeny vyšší průtoky jako u vyšších vrstev. Bylo to způsobeno zejména mezerami mezi distanční roštnicí a stěnou. Venturiho trubice je kalibrována na měření od $600 \text{ m}_n^3/\text{h}$, proto musíme naměřené hodnoty pod touto hranicí brát s rezervou, avšak dle chování paliva nad touto hranicí se hodnoty jeví jako správné. U všech vrstev docházelo při posunu do pozice P2 a P3 k poklesu tlakové ztráty. Palivo se tedy chovalo stejně jako samotný rošt. Během posuvu roštnic docházelo k vzniku mezer ve vrstvě paliva a odkrývání roštu - Obrázek 6.19. Těmito mezerami volně proudil vzduch a způsoboval tak výraznější pokles tlakové ztráty v polohách P2 a P3, zejména u vrstvy 10 cm. - Graf 6.17.



Obrázek 6.19: Odkrytí roštu při poloze P3 a 10 cm vysoké vrstvě kávové sedliny [7]



Graf 6.17: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $524 \text{ m}_n^3/\text{h}$



Graf 6.18: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1



Obrázek 6.20: Vrstva 10 cm kávové sedliny v polohách roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]

	<u>Pozice roštu P1</u>													
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	524	554	441	497	524	554	658	441	497	524	554	658
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	350	384	432	421	673	771	808	842	948	869	994	1046	1112	1330
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,16	0,17	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20
	<u>Pozice roštu P2</u>													
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	524	554	441	497	524	554	658	441	497	524	554	658
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	271	309	324	337	621	712	751	798	924	888	1026	1088	1159	1355
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,16	0,17	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20
	<u>Pozice roštu P3</u>													
Vrstva paliva	<u>10 cm</u>				<u>20 cm</u>					<u>30 cm</u>				
Průtok vzduchu (m_n^3/h)	441	497	524	554	441	497	524	554	658	441	497	524	554	658
Tlaková ztráta – rošt + palivo (Pa)	234	269	288	304	537	618	653	695	828	795	925	987	1059	1287
Rychlost nad roštem (m/s)	0,13	0,15	0,16	0,17	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20	0,13	0,15	0,16	0,17	0,20

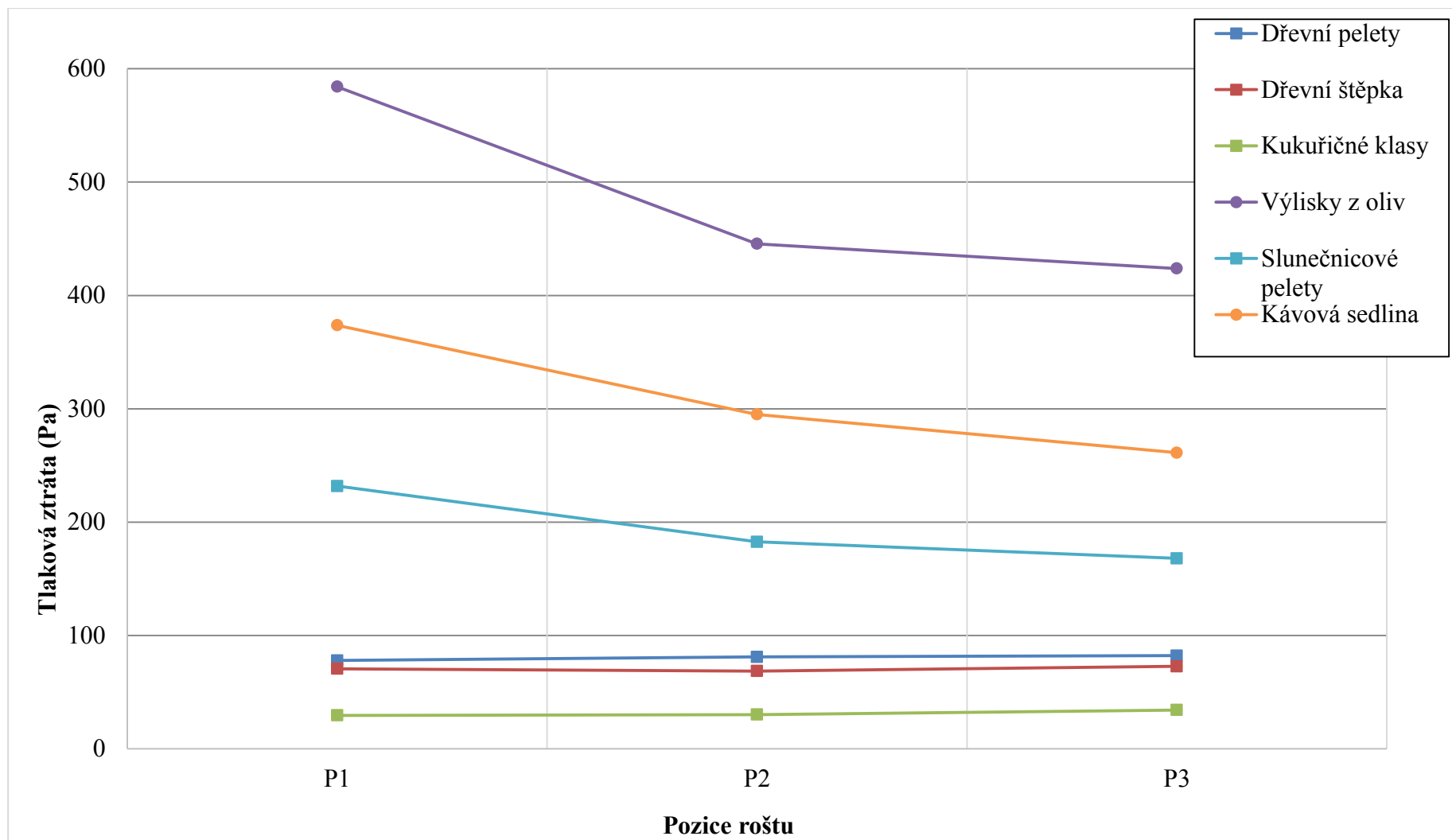
Tabulka 6.11: Parametry pro kávovou sedlinu

6.5 Vyhodnocení měření paliv

Měřením na standu byly stanoveny charakteristiky proudění vzduchu skrz rošt s palivem. Konkrétně se jednalo o 6 pevných biopaliv - dřevní pelety, pelety ze slunečnicových slupek, kukuřičné klasy, dřevní štěpka, výlisky z oliv a kávová sedlina. Charakteristiky jsou stanoveny pro 3 rozdílné tloušťky vrstvy paliva na roštu – pro 10, 20 a 30 cm. S každou vrstvou paliva byly proměřeny stejné průtoky ve třech možných pozicích roštu. Graf 6.19 znázorňuje tlakovou ztrátu pro jednotlivá paliva o tloušťce 10 cm na roštu v pozici P1 při průtoku $658 \text{ m}_n^3/\text{h}$.

Výsledné charakteristiky, zařazené v kapitole zabývající se konkrétním palivem, zachycují vývoj tlakové ztráty s rostoucím průtokem, se změnou polohy roštu a se změnou tloušťky vrstvy paliva. Fotodokumentace pořízená při měření objasňuje chování tlakové ztráty paliva na roštu a rovněž zachycuje změny ve vrstvě, ke kterým dochází při pohybu roštu a proudění vzduchu skrze vrstvu.

Cyklon byl využíván vždy na počátku měření a dle situace odpojován. Při vyšším úletu částic bylo měření přerušeno, popřípadě snížena hodnota průtoku. V cyklonu bylo po ukončení měření nalezeno jen nepatrné množství paliva. Z dominantní části se jednalo o nejjemnější částice kávové sedliny.



Graf 6.19: Vliv pozice roštu na tlakovou ztrátu pro jednotlivá paliva o tloušťce vrstvy 10 cm a průtoku $658 \text{ m}_n^3/\text{h}$

6.6 Vylepšení stávajícího zařízení

Během provozu měřicího zařízení se objevily mnohé situace, které nebylo možné předem předvídat a při konstrukci dalšího zařízení by bylo vhodné na ně pamatovat.

Uzavírací systém – vzhledem k neustálému otevírání a zavírání dvířek by bylo vhodnější užít místo šroubů s motýlkovou hlavou systém s rychloupínáky.

Posuv roštnic – již před začátkem měření byl upraven a vybaven klikou pro rychlejší a snadnější posuv. I toto řešení však mělo své limity. Pro měření prázdného roštu a většiny paliv by bylo vhodnější užít pohybový šroub s větším stoupáním, který by umožnilo rychlejší pohyb. Některá paliva však kladla při posuvu roštnic značný odpor a tak by zvětšení stoupání danou situaci ještě zhoršilo. Řešením by mohlo být užití servomotoru s dostatečným výkonem pro rychlejší pohyb roštnic a tím i obsluhu zařízení.

Distanční roštnice – umístění distančních roštnic způsobovalo občasné problémy jak při jejich obtížné montáži/demontáži, tak při běžném měření. Jejich podstatou bylo umožnit měření s mezerami mezi roštnicemi a také umožňovaly samotnou manipulaci s roštnicemi. Při posuvu roštnic docházelo k tomu, že roštnice se neposunula s celou řadou – zasekla se a vznikala tak mezera, kterou bylo nutné odstranit. Tyto distanční roštnice nedosedávaly přesně na kulatiny nesoucí roštnice, jelikož překážel svar upevňující kulatinu ke stěně. To by bylo možné vyřešit částečným vybroušením roštnice nebo svaru. Nejlepším řešením by mohlo být užití jediné roštnice o přesné šířce místo 2 - 3 distančních roštnic o požadované šířce. Řešení s jedinou roštnicí by bylo spolehlivější, provozně jednodušší a umožňovalo by manipulaci s roštnicemi.



Obrázek 6.21: Detail zaseknutí distanční roštnice (stříbrná) mezi stěnou a kulatinou [7]

Měření průtoku – Použitá Venturiho trubice je kalibrována pro průtoky

600 - 6 000 m_n³/h. Při měření paliv jako kávová sedlina a olivové výlisky nebylo možné vzhledem k zvýšenému úletu a pohybu paliva na roštu dosahovat vyšších průtoků, jako například u pelet a dřevní štěpky. Měření bylo zahájeno na průtocích pod hranicí kalibrace. Tuto situaci by šlo napravit záměnou měřícího zařízení například za anemometr, který by dovoľoval i spolehlivé měření nižších průtoků – pod 600 m_n³/h.

6.7 Srovnání s reálnou situací

Práce obsahuje měření biopaliv paliva zastudena. Popisuje tedy stav paliva na začátku roštu, než dojde k prvním fázím hoření paliva. Během spalovacího procesu se mění vlastnosti paliva a tím také tlaková ztráta vrstvy. Testovací zařízení je vybaveno 5 řadami roštnic, z toho jsou dvě řady pohyblivé. Roštnice a jejich uspořádání je identické jako na reálných zařízeních. Při pohybu paliva dochází ve spodní části zařízení k hromadění paliva, jelikož palivo nepokračuje na další roštové řady. Omezeným počtem řad je přerušena kontinuita toku paliva, jako je tomu na skutečném roštu. Díky omezenému prostoru pro palivo docházelo při posunu některých paliv k přechování vrstvy a změně tlakové ztráty.

7 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval stanovením charakteristik pevných biopaliv na pohyblivých roštích. Teoretická část představuje nejčastější typy ohnišť spalovacích zařízení. Blíže se věnuji roštovým kotlům – popisuji jejich části, funkci a principy provozu.

V praktické části jsem dle požadavku firmy Vyncke navrhl testovací zařízení pro simulaci proudění primárního spalovacího vzduchu skrz vrstvu paliva na roštu. Testovací stand využívá identické roštnice a jejich uspořádání jako reálné spalovací zařízení. Vysvětlil jsem řešení jednotlivých požadavků na zařízení a tím představil celý koncept. Testovací zařízení je určeno pro stanovení tlakové ztráty roštu v různých konfiguracích. Znalost tlakové ztráty je klíčová pro správné dimenzování ventilátoru spalovacího vzduchu a kvalitní návrh roštové plochy, umožňující nízkou emisi CO. Tlakovou ztrátu jsem vypočítal pomocí Ergunovy rovnice a porovnal se změřenou hodnotou. Vzhledem k těžko stanovitelným vstupním hodnotám do rovnice, je spolehlivý výpočet nemožný a proto jsem charakteristiky určil prostřednictvím hodnot naměřených na testovacím standu. Pomocí zvětšení mezer mezi roštnicemi jsem simuloval tepelné roztažení roštnic během provozu a zjišťoval charakteristiky popisující vývoj tlakové ztráty s rostoucím průtokem v jednotlivých pozicích roštu pro tři různé distance mezi roštnicemi. Testoval jsem 6 pevných biopaliv – dřevní pelety, pelety ze slunečnicových slupek, kukuřičné klasy, dřevní štěpka, výlisky z oliv a kávovou sedlinu. Všechny palivy jsem měřil ve třech polohách roštu pro vrstvy 10, 20 a 30 cm. Zjistil jsem charakteristiky závislosti tlakové ztráty na průtoku a výšce paliva pro každou polohu roštu. Při měření jsem pořídil podrobnou fotodokumentaci, objasňující chování tlakové ztráty paliva na roštu a rovněž zachycující změny ve vrstvě, ke kterým dochází při pohybu roštu a proudění vzduchu skrze vrstvu. V závěru práce jsem navrhl vylepšení měřicího zařízení a porovnal s reálnou situací.

Na stávajícím zařízení je možné dále pokračovat v měření a rozšiřovat mou práci. Konkrétně proměřením dalších paliv a různých směsí skládající se z více paliv. Dále použít jiné roštnice, které jsou s měřícím standem kompatibilní.

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkovat všem, kteří se zapojili do tvorby mé diplomové práce. Jmenovitě svému vedoucímu práce panu Doc. Dr. Ing. Tadeáši Ochodkovi za vedení a zprostředkování velmi zajímavého tématu. Panu Hansi Fastenaekelsovi z firmy Vyncke a společnosti samotné za možnost zpracovat diplomový projekt, řešící reálný problém a tím zvýšit hodnotu své práce.

Panu Ing. Petru Musilovi z firmy Vyncke za spolupráci a cenné rady, poskytované nejenom během častých osobních konzultací jak při vývoji zařízení, tak při samotném měření. Kolektivu pracovníků Výzkumného energetického centra, zejména však Ing. Jiřímu Horákovi PhD. a Ing. Františku Hopanovi PhD. za velmi vstřícný přístup a asistenci při samotném měření. Rovněž děkuji své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

8 Seznam použité literatury

[1]

ČERNÝ, Václav, Luděk HRDLIČKA, Břetislav JANEBA, Jan KARTÁK a Miroslav PIKMAN. *Parní kotle a spalovací zařízení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 526 s. Řada strojírenské literatury.

[2]

KYSELA, Ladislav, Jiří MÍKA a Sylva KYSELOVÁ. *Teplárenství*. Ostrava, 2011.

[3]

ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. *Parní kotle: (návod do cvičení)* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>

[4]

BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle - 1. část. In: [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>

[5]

BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle - 2. část. In: [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>

[6]

Materiály firmy Vyncke

[7]

Vlastní fotodokumentace

[8]

AUTOMATICKÉ KOTLE. In: [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.defro.cz/automaticke-kotle--nejprodavanejsi-typ---defro-duo---defro-duo-uni-str-24-1-24-2.html>

[10]

Technické a kalibrační listy zařízení

[11]

<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/cyclone+furnace>

[12]

<http://vec.vsb.cz>

[13]

Výsledky laboratorního měření v TÜV Nord a UTB

9 Seznam tabulek, obrázků, grafů a příloh

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Hodnoty při zapojení jednotlivých měřicích bodů	41
Tabulka 6.1: Parametry prázdného roštu	49
Tabulka 6.2: Parametry prázdného roštu s rozdílnou mezerou mezi roštnicemi	52
Tabulka 6.3: Stanovení metodiky měření	56
Tabulka 6.4: Parametry testovaných paliv [6], [13]	59
Tabulka 6.5: Parametry pro dřevní pelety	65
Tabulka 6.6: Srovnání naměřené a spočtené tlakové ztráty porozitu $\varepsilon=0,3$ a $\varepsilon=0,4$	66
Tabulka 6.7: Parametry pro dřevní štěpku	70
Tabulka 6.8: Parametry pro kukuřičné klasy	74
Tabulka 6.9: Parametry pro výlisky z oliv	78
Tabulka 6.10: Parametry pro pelety ze slunečnicových slupek	82
Tabulka 6.11: Parametry pro kávovou sedlinu	86

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Kombinovaný kotel Vyncke s roštovým ohništěm pro spalování dřevního odpadu a plynovým hořákem [3]	11
Obrázek 2.2: Cyklónové ohniště [10]	12
Obrázek 3.1: Hlavní části roštového ohniště	13
Obrázek 3.2: Fáze hoření na šikmém roštu [6]	15
Obrázek 3.3: Tvar roštového ohniště [5] a) s jedním ohniskem hoření	19
Obrázek 3.4: Pásový rošt [2]	22
Obrázek 3.5: Částečně vodou chlazený, prohrabávací rošt Vyncke [6]	23
Obrázek 3.6: Retortový rošt [8]	23
Obrázek 3.7: Systém pohybu FW roštnic [6]	25
Obrázek 4.1: Plně vodou chlazený, prohrabávací rošt Vyncke [6]	28
Obrázek 4.2: Roštnice z částečně vodou chlazeného roštu - semi water cooled (SW) [6]	29
Obrázek 4.3: Roštnice z plně vodu chlazeného roštu - fully water cooled (FW) [6]	29
Obrázek 4.4: Umístění plexiskla na testovacím zařízení	30
Obrázek 4.5: Halogenová lampa umístěna v horní části zařízení [7]	31
Obrázek 4.6: Uspořádání roštových řad: fixní – pohyblivá – fixní – pohyblivá	31
Obrázek 4.7: Uspořádání roštových řad: pohyblivá – fixní – pohyblivá - fixní	32
Obrázek 4.8: Uspořádání roštových řad: fixní – pohyblivá – fixní – pohyblivá – fixní	32
Obrázek 4.9: Krajní SW roštnice [6]	33
Obrázek 4.10: Vymezovací plech [7]	34
Obrázek 4.11: Pohyb SW roštnic	34
Obrázek 4.12: Mechanismus pohybu roštnic - boční pohled	35
Obrázek 4.13: Mechanismus pohybu roštnic - horní pohled	35
Obrázek 4.14: Původní systém posuvu roštnic [7]	35
Obrázek 4.15: Vylepšený systém - klika pro posun roštnic [7]	36

Obrázek 4.16: Hradítko nastaveno na zarovnání 10 cm vrstvy paliva [7].....	37
Obrázek 4.17: Hradítko nastaveno na zarovnání 20 cm vrstvy paliva [7].....	37
Obrázek 4.18: Hradítko nastaveno na zarovnání 30 cm vrstvy paliva [7].....	37
Obrázek 4.19: Schéma testovací trati	39
Obrázek 4.20: Měřicí stand [7]	40
Obrázek 4.21: Umístění měřicích bodů (pohled z boku) [7]	41
Obrázek 4.22: Měřicí body (pohled zevnitř) [7]	41
Obrázek 5.1: Venturiho trubice [7].....	43
Obrázek 5.2: Cyklon a jeho napojení [7].....	43
Obrázek 5.3: Snímač tlaku Cressto [7]	44
Obrázek 5.4: Snímač tlaku Yokogawa [7].....	44
Obrázek 5.5: Charakteristika ventilátoru Nedermann NFC 80/20 50 Hz [11]	45
Obrázek 5.6: Ovládací rozhraní ventilátoru [7]	46
Obrázek 5.7: Možné polohy pohyblivé roštnice [7]	47
Obrázek 6.1: Prázdný rošt v poloze (P1) s červeně vyznačenými koncovými polohami (P3) pohyblivých roštnic [7]	48
Obrázek 6.2: Distanční plechy o tloušťce 1mm - P50, 2mm - P51, 3mm - P52, 4mm - P53 [7].....	50
Obrázek 6.3: Detail roštové plochy s vloženými distančními plechy mezi roštnicemi [7]	51
Obrázek 6.4: Roštová plocha s vloženými distančními plechy [7].....	52
Obrázek 6.5: Zarovnaná 10 cm vrstva pelet, rošt v pozici P1 [7].....	54
Obrázek 6.6: Rošt v pozici P2, bez zarovnání paliva po přesunu roštu z pozice P1 [7].	55
Obrázek 6.7: Rošt v pozici P3, bez zarovnání paliva po přesunu z pozice P2 [7].....	55
Obrázek 6.8: Dřevní pelety [7]	60
Obrázek 6.9: Dřevní štěrka [7].....	67
Obrázek 6.10: Vrstva 10 cm dřevní štěrky na roštu v poloze P2 [7]	67
Obrázek 6.11: Mezera vzniklá posuvem roštu [7].....	68
Při posunu roštových řad docházelo k rozrušení vrstvy a vzniku mezer - Obrázek 6.11. Těmito mezerami volně proudil vzduch a způsoboval v poloze roštu P2 značný pokles tlakové ztráty - Graf 6.10. Nedocházelo k vzniku vln a vysunutí materiálu vzhůru -	
Obrázek 6.10, ale materiál	68
Obrázek 6.12: Kukuřičné klasy [7].....	71
Obrázek 6.13: Měření 10 cm vrstvy kukuřičných klasů v poloze roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]	72
Obrázek 6.14: Výlisky z oliv [7]	75
Obrázek 6.15: Vrstva 20 cm výlisku z oliv v poloze roštu P2 [7].....	76
Obrázek 6.16: Pelety ze slunečnicových slupek [7]	79
Obrázek 6.17: Měření 10 cm vrstvy pelet v poloze roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]	80
Obrázek 6.18: Kávová sedlina [7]	83
Obrázek 6.19: Odkrytí roštu při poloze P3 a 10 cm vysoké vrstvě kávové sedliny [7] .	84
Obrázek 6.20: Vrstva 10 cm kávové sedliny v polohách roštu P1 P2 a P3 (odshora) [7]	85

Obrázek 6.21: Detail zaseknutí distanční roštnice (stříbrná) mezi stěnou a kulatinou [7]	89
------------------------------------------------------------------------------------------	----

Seznam grafů

Graf 6.1: Závislost tlakové ztráty prázdného roštu na průtoku vzduchu	49
Graf 6.2: Vliv mezery mezi roštnicemi na tlakovou ztrátu v jednotlivých polohách pro průtok $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$	53
Graf 6.3: Vliv pozice roštu na tlakovou ztrátu pro různé mezery mezi roštnicemi	53
Graf 6.4: Tlaková ztráta v jednotlivých situacích	57
Graf 6.5: Vypočtená tlaková ztráta pro porozitu materiálu $\varepsilon = 0,3$ a $\varepsilon = 0,4$	63
Graf 6.6: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	64
Graf 6.7: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$	64
Graf 6.8: Srovnání naměřené a spočtené tlakové ztráty porozitu $\varepsilon = 0,3$ a $\varepsilon = 0,4$	66
Graf 6.9: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	69
Graf 6.10: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$	69
Graf 6.11: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$	73
Graf 6.12: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	73
Graf 6.13: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $738 \text{ m}_n^3/\text{h}$	76
Graf 6.14: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	77
Graf 6.15: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	81
Graf 6.16: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $1274 \text{ m}_n^3/\text{h}$	81
Graf 6.17: Závislost tlakové ztráty na tloušťce vrstvy paliva a pozici roštu pro průtok vzduchu $524 \text{ m}_n^3/\text{h}$	84
Graf 6.18: Závislost tlakové ztráty na výšce paliva a průtoku vzduchu v poloze roštu P1	85
Graf 6.19: Vliv pozice roštu na tlakovou ztrátu pro jednotlivá paliva o tloušťce vrstvy 10 cm a průtoku $658 \text{ m}_n^3/\text{h}$	88

Seznam Příloh

- Příloha č.1 – Informativní výkres formátu A1 – Měřicí stand
Příloha č.2 – CD s elektronickou verzí práce